固高科技

GXY 系列 XY 平台

实验指导书

Version 2.0

2006.08

版权声明

固高科技（深圳）有限公司
保留所有版权

固高科技有限公司（以下简称固高科技）具有本产品及其软件的专利权、版权和其它知识产权。未经授权，不得直接或间接的复制、制造、加工、使用本产品及相关部分。

声明

固高科技保留在不预先通知的情况下修改设备和文档的权力。

固高科技不承担由于使用本说明书或本产品不当，所造成的直接的、间接的、特殊的、附带的、或相应的损失和赔偿。

安全注意事项

XY 平台主要用于教学和科研。在安装，使用和维护之前，请仔细阅读 XY 平台使用手册的相关文档。并将 XY 平台使用手册备在身边，以备需要时随时查阅。

使用注意事项

使用（安装、运转、保养、检修）前，请务必熟悉并全部掌握本手册和其它相关资料，在熟知全部机器知识、安全知识、以及注意事项后再使用设备。

本手册将安全注意事项分为“ 危险 ”“ 注意 ”“ 强制 ”“ 禁止 ” 分别记载。

表 1-1 警告标志

危 险	不正确的操作将会导致重大人身事故。
注 意	不正确的操作会导致设备损坏。
强 制	必须要做的操作。
禁 止	被禁止的操作。

另外，即使“ 注意 ”所记载的内容，也可能因为不同的情况产生严重后果，因此任何一条注意事项都很重要，在设备使用过程中请严格遵守。

	虽然不符合“ 危险 ”“ 注意 ” 的内容，但是用户在使用过程中必须严格遵守的事项，在相关地方以记载。

前　言

XY 平台是许多数控加工设备和电子加工设备（如：数控车床的纵横向进刀装置、数控铣床和数控钻床的 XY 工作台、激光加工设备工作台，表面贴装设备等）的基本部件，也是进行相关科学研究和设备开发的理想模型。本实验系统选用的 XY 平台采用了模块化设计思想和工业化制造标准，具有现实工业意义和广泛的应用背景。

本实验指导书以运动控制技术为主要实验内容，以 XY 运动平台为实验对象。适用于机械制造及自动化、机电工程、运动控制技术、数控技术等相关专业的实验教学。

实际使用时，用户可根据不同课程的教学实验需要选择相关内容。

目 录

版权声明.....II
声明.....II
安全注意事项.....III
使用注意事项.....III
前 言.....IV
第 1 章 概述.....1
1.1 运动控制技术基础.....1
1.1.1 运动控制系统简介.....1
1.1.2 运动控制器.....1
1.1.3 运动控制器与伺服系统的匹配.....2
1.1.4 运动控制系统典型应用.....2
1.2 XY平台系统组成.....3
第 2 章 电机与驱动（执行）装置实验.....4
2.1 实验目的.....4
2.2 知识回顾.....4
2.3 实验设备.....5
2.4 实验步骤.....6
2.5 实验总结.....7
第 3 章 直流伺服电机位置阶跃响应实验.....7
3.1 实验目的.....7
3.2 基础知识.....7
3.2.1 直流伺服电机概述.....7
3.2.2 直流伺服电机模型.....8
3.3 实验设备.....10
3.4 实验步骤.....10
3.5 实验总结.....11
第 4 章 运动控制器的调整－PID控制器的基本控制作用.....13
4.1 实验目的.....13
4.2 基础知识.....13
4.3 实验设备.....13
4.4 实验步骤.....13
4.5 实验总结.....17
第 5 章 单轴电机运动控制实验.....17
5.1 实验目的.....17
5.2 基础知识.....17
5.2.1 加减速控制.....17
5.2.2 电子齿轮.....19
5.3 实验设备.....19
5.4 实验步骤.....19
5.4.1 T曲线、S曲线运动模式实验.....19
5.4.2 单轴速度控制模式运行实验.....21
5.4.3 电子齿轮模式运行实验.....22
5.5 实验总结.....23

第 6 章 二维插补原理及实现实验.....23
6.1 实验目的.....23
6.2 实验原理.....24
6.2.1 逐点比较法直线插补.....24
6.2.2 逐点比较法圆弧插补.....25
6.2.3 数字积分法直线插补.....27
6.2.4 数字积分法圆弧插补.....27
6.3 实验设备.....33
6.4 实验内容.....33
6.4.1 二维直线插补实验.....33
6.4.2 圆弧插补（圆心/角度型）实验.....34
6.4.3 圆弧插补（终点/半径型）实验.....35
6.4.4 逐点比较法直线插补实验.....36
6.4.5 逐点比较法圆弧插补实验.....36
6.4.6 数字积分法直线插补实验.....37
6.4.7 数字积分法圆弧插补实验.....38
6.4.8 插补算法的高级语言编程实验.....40
6.5 实验总结与思考.....40
第 7 章 数控代码编程实验.....42
7.1 实验目的.....42
7.2 基础知识.....42
7.3 实验设备.....44
7.4 实验步骤.....44
7.4.1 数控代码运行认识实验.....44
7.4.2 编写数控代码（G00/G01/G02/G03 指令）实验.....46
7.4.3 G17/G18/G19 指令编程实验.....47
7.4.4 G90/G91/G92 指令编程实验.....49
7.5 实验报告及总结.....51

第1章 概述

1.1 运动控制技术基础

1.1.1 运动控制系统简介

运动控制起源于早期的伺服控制，简单地说，运动控制就是对机械运动部件的位置、速度等进行实时的控制管理，使其按照预期的轨迹和规定的运动参数（如速度、加速度参数等）完成相应的动作。

实际应用中，运动控制系统是由运动控制器、功率放大驱动器、伺服电机、起反馈作用的传感器、加上一些传动机械系统部件组成。

运动控制器是以中央逻辑控制单元为核心、以传感器为信号元件，以电机/动力装置和执行单元为控制对象的一种控制装置，

运动控制系统通常有开环控制和闭环控制两种形式。

如图 1-1 所示，为开环运动控制系统的典型构成。在开环控制系统中，系统的输出量对控制作用没有影响，既不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到系统的输入端与输入量进行比较。采用步进电机的位置控制系统就是开环控制系统的例子。步进驱动与控制器只是按照指令位置运动，不必对输出信号（即实际位置）进行测量。

图 1-1 典型的开环运动控制系统结构

在闭环控制系统中，作为输入信号与反馈信号之差的作用误差信号被传送到控制器，以便减小误差，并且使系统的输出达到希望的值。闭环控制系统的优点是采用了反馈，因而使系统的响应对外部干扰和内部系统的参数变化均不敏感。这样，对于给定的控制对象，有可能采用不太精密且成本较低的元件构成精确的控制系统，采用交流伺服电机的位置控制系统（如图 1-2 所示）就是闭环控制系统的一个例子，安装在电机轴上的编码器不断检测电机轴的实际位置（输出量），并反馈回伺服驱动器与参考输入位置进行比较，PID 调节器根据位置误差信号，控制电机正转或反转，从而将电机位置保持在希望的参考位置上。

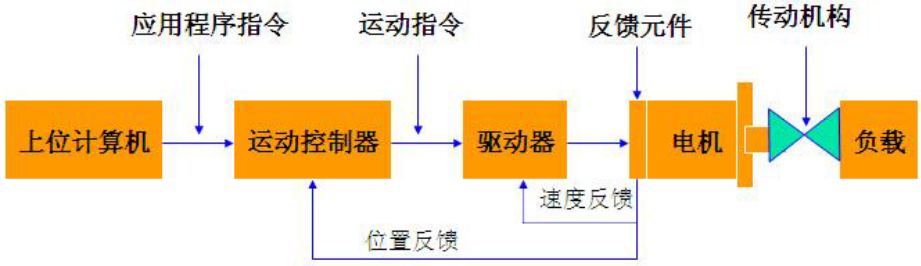


图 1-2 典型的闭环运动控制系统结构

1.1.2 运动控制器

运动控制器是以中央逻辑控制单元为核心、以传感器为信号元件，以电机/动力装置和执行单元为控制对象的一种控制装置，主要用于对机械传动装置的位置、速度进行实时的控制管理，使运动部件按照预期的轨迹和规定的运动参数完成相应的动作。

与传统的数控装置相比，运动控制器具有以下特点：

- 技术更新，功能更加强大，可以实现多种运动轨迹控制，是传统数控装置的换代产品；
- 结构形式模块化，可以方便地相互组合，建立适用于不同场合、不同功能需求的控制系统；
- 操作简单，在 PC 上经简单编程即可实现运动控制，而不一定需要专门的数控软件。

目前，运动控制技术由面向传统的数控加工行业专用运动控制技术而发展为具有开放结构、能结合具体应用要求而快速重组的先进运动控制技术。与此相适应，运动控制器从以单片机、微处理器为核心或以专用芯片(ASIC)为核心处理器的运动控制器，发展到了基于 PC 总线的以 DSP 和 FPGA 作为核心处理器的开放式运动控制器。

这种开放式运动控制器，充分利用 DSP 的计算能力，进行复杂的运动规划、高速实时多轴插补、误差补偿和运动学、动力学计算，使得运动控制精度更高、速度更快、运动更加平稳；充分利用 DSP 和 FPGA 技术，使系统的结构更加开放，可根据用户的应用要求进行客制化的重组，设计出个性化的运动控制器。基于 PC 总线的开放式运动控制器已成为当今自动化领域应用最广、功能最强的运动控制器，并且在全球范围内得到了广泛的应用。

1.1.3 运动控制器与伺服系统的匹配

目前广泛采用的交流伺服系统（电机+驱动）通常具有力矩控制、速度控制和位置控制等闭环控制功能。而常用的运动控制器除了具有轨迹规划功能外，也具有位置控制和速度控制等闭环控制功能。运动控制器与交流伺服系统组合时，通常有如图所示的三种方式。本实验系统采用的是如图 1-4 所示的第二种方式。

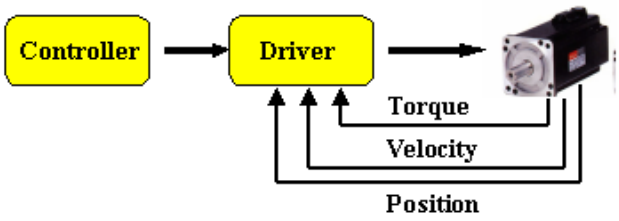


图 1-3 位置脉冲型闭环控制系统方案 1

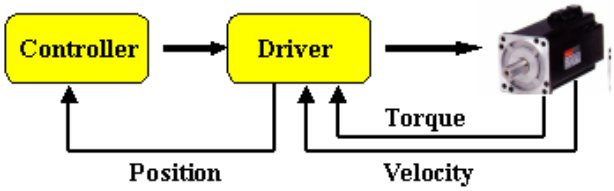


图 1-4 闭环控制系统方案 2

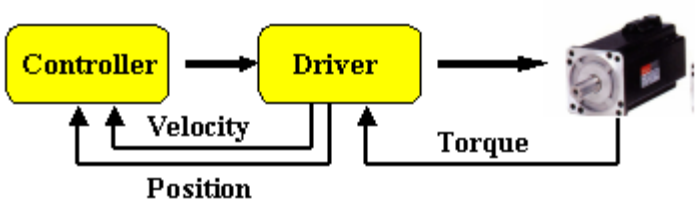


图 1-5 闭环控制系统方案 3

1.1.4 运动控制系统典型应用

根据运动控制的特点和应用，运动控制可分为点位控制、连续轨迹控制和同步控制运动控制三种基本方式。

点位控制

这种运动控制的特点是仅对终点位置有要求，与运动的中间过程即运动轨迹无关。相应的运动控制器要求具有快速的定位速度，在运动的加速段和减速段，采用不同的加减速控制策略。在加速运动时，为了使系统能够快速加速到设定速度，往往提高系统增益和加大加速度，在减速的末段采用 S 曲线减速的控制策略。为了防止系统到位后震动，规划到位后，又会适当减小系统的增益。所以，点位运动控制器往往具有在线可变控制参数和可变加减速曲线的能力。

典型应用有：

PCB 钻床、SMT、晶片自动输送、IC 插装机、引线焊接机、纸板运送机驱动、包装系统、码垛机、激光内雕机、激光划片机、坐标检验、激光测量与逆向工程、键盘测试、来料检验、显微仪、定位控制、PCB 测试、焊点超生扫描检测、自动织袋机、地毯编织机、定长剪切，折弯机控制。

连续轨迹控制

又称为轮廓控制，主要应用在传统的数控系统、切割系统的运动轮廓控制。相应的运动控制器要解决的问题是如何使系统在高速运动的情况下，既要保证系统加工的轮廓精度，还要保证刀具沿轮廓运动时的切向速度的恒定。对小线段加工时，有多段程序预处理功能。

典型应用有：

数控车、铣床，雕刻机、激光切割机、激光焊接机、激光雕刻机、数控冲压机床、快速成型机、超声焊接机、火焰切割机、等离子切割机、水射流切割机、电路板特型铣、晶片切割机。

同步控制

是指多个轴之间的运动协调控制，可以是多个轴在运动全程中进行同步，也可以是在运动过程中的局部有速度同步，主要应用在需要有电子齿轮箱和电子凸轮功能的系统控制中。工业上有印染、印刷、造纸、轧钢、同步剪切等行业。相应的运动控制器的控制算法常采用自适应前馈控制，通过自动调节控制量的幅值和相位，来保证在输入端加一个与干扰幅值相等、相位相反的控制作用，以抑制周期干扰，保证系统的同步控制。

典型应用有：

套色印刷、包装机械、纺织机械、飞剪、拉丝机、造纸机械、钢板展平、钢板延压、纵剪分条等。

1.2 XY 平台系统组成

GXY 系列工作台集成有 4 轴运动控制器、电机及其驱动、电控箱、运动平台等部件。各部件全部设计成相对独立的模块，便于面向不同实验进行重组。

机械部分是一个采用滚珠丝杠传动的模块化十字工作台，用于实现目标轨迹和动作。为了纪录运动轨迹和动作效果，专门配备了笔架和绘图装置，笔架可抬起或下降，其升降运动由电磁铁通、断电实现，电磁铁的通断电信号由控制卡通过 IO 口给出。

执行装置根据驱动和控制精度的要求可以分别选用交流伺服电机，直流伺服电机和步进电机。直流伺服电机具有起动转矩大、体积小、重量轻、转矩和转速容易控制、效率高的优点。但维护困难，使用寿命短，速度受到限制。交流伺服电机具有高速，高加速度，无电刷维护，环境要求低等优点，但驱动电路复杂，价格高。一般伺服电机和驱动器组成一个速度闭环控制系统，用户则根据需要可通过运动控制器构造一个位置（半）闭环控制系统。步进电机不需要传感器，不需要反馈，用于实现开环控制；步进电机可以直接用数字信号进行控制，与计算机的接口比较容易；没有电刷，维护方便、寿命长；启动、停止、正转、反转容易控制。步进电机的缺点是能量转换效率低，易失步（输入脉冲而电机不转动）等。当采用交流伺服电机作为执行装置时，安装在电机轴上的增量码盘充当位置传感器，用于间接测量机械部分的移动距离，如果要直接测量机械部分移动位移，则必须额外安装光栅尺等直线位移测量装置。

控制装置由 PC 机、GT-400-SV（或 GT-400-SG）运动控制卡和相应驱动器等组成。运动控制卡接受 PC 机发出的位置和轨迹指令，进行规划处理，转化成伺服驱动器可以接受的指令格式，发给伺服驱动器，由伺服驱动器进行处理和放大，输出给执行装置。控制装置和电机（执行装置）之间的连接示意如下图 1-6 所示：

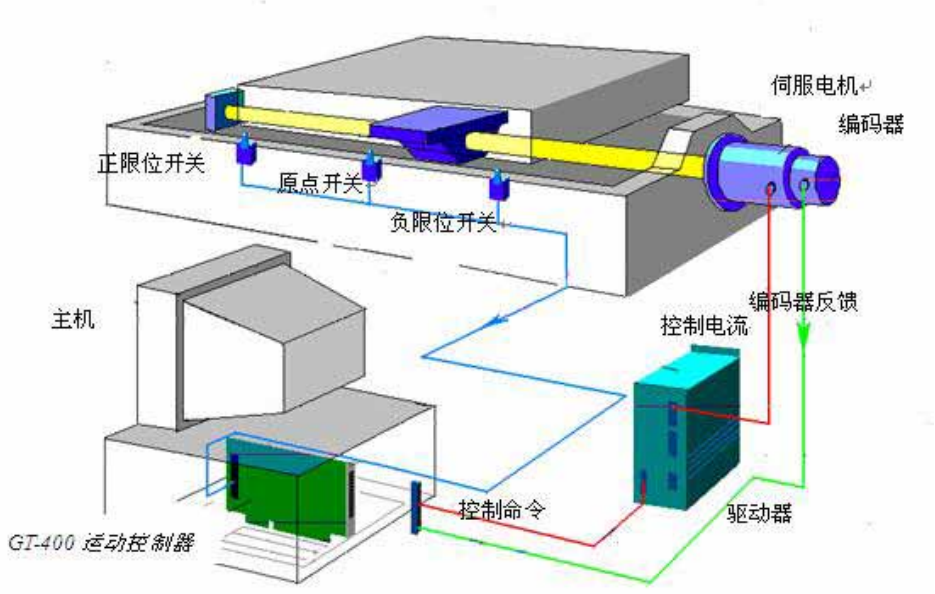


图 1-6 GT 运动控制器典型应用

第2章　电机与驱动（执行）装置实验

2.1 实验目的

了解目前工业上常用的几种电机与驱动装置的构造和使用方法，掌握其各自的特点、性能和选用方法。

2.2 知识回顾

步进电机和驱动装置、直流伺服电机及其驱动装置、交流伺服电机及其驱动装置、直线电机及其驱动装置的基本原理和特点

执行装置就是“ 按照电信号指令，将来自电、液压和气压等各种能源的能量转换成旋转运动、直线运动等方式的机械能的装置 ”。按利用的能源分类，可将执行装置大体分为电动执行装置、液压执行装置和气动执行装置。在电动执行装置中，有直流电机、交流电机、步进电机和直接驱动电机等实现旋转运动的电动机，以及实现直线运动的直线电机。电动执行装置由于其能源容易获得，使用方便，所以得到了广泛的应用。本实验主要介绍电动执行装置的原理和特点。

直流电机等电动执行装置，都是由电磁力来产生直线驱动力和旋转驱动力矩的，其基本工作原理相同。跟据电磁感应原理可知，电机所产生的转矩与电流的大小成正比。在机电一体化系统中，目前最为常用的电动执行装置有：直流伺服电机、交流伺服电机、步进电机与直接驱动电机等。

表 2-1 各种电机的不同的特性、工作原理与控制方式

电机类型	主要特点	构造与工作原理	控制方式
直流伺服电机	只需接通直流电即可工作，控制特别简单； 启动转矩大、体积小、重量轻、转速和转矩容易控制、效率高 需要定时维护和更换电刷，使用寿命短、噪声大。	由永磁体定子、线圈转子、电刷和换向器构成。通过电刷和换向器使电流方向不断随着转子的转动角度而改变，实现连续旋转运动	转速控制采用电压控制方式，因为控制电压与电机转速成正比。 转矩控制采用电流控制方式，因为控制电流与电机转矩成正比。
交流伺服电机	没有电刷和换向器，不需维护，也没有产生火化的危险； 驱动电路复杂，价格高；	按结构分为同步电机和异步电机，转子是由永磁体构成的为同步电机，转子是由绕组形成的电磁铁构成的为异步电机。无刷直流电机，结构与同步电机相同，	分为电压控制和频率控制两种方式。异步电机通常采用电压控制方式。

		特性与直流电机相同。	
步进电机	直接用数字信号进行控制，与计算机的接口比较容易；没有电刷，维护方便、寿命长；启动、停止、正转、反转容易控制。步进电机的缺点是能量转换效率低，易失步等	按产生转矩的方式可分为永磁体式（PM）,可变磁阻式（VR）,和混合式(HB)。PM 式产生的转矩较小，多用于计算机外围设备和办公设备；VR 式能够产生中等转矩，而 HB 式能够产生较大转矩，因此应用最广	单相励磁：精度高，但易失步； 双相励磁：输出转矩大，转子过冲小，常用方式，但效率低； 单-双相励磁：分辨率高，运转平稳。

2.3 实验设备

- 标准 GXY-1010 步进工作台一套
- 标准 GXY-1010 伺服工作台一套（数字控制方式连接）
- GT-400-SG，SV 板卡各一块
- PC 机一台

GXY 系列步进平台选用的步进电机和驱动器为北京四通电机公司的产品。以 GXY1010 为例：驱动型号为 SH-20503，电机型号为 57BYG250E-0302，该电机为混合式 2 相步进电机，步矩角 0.9/1.8 度，静转矩 1.5Nm，其矩频特性见图 2-1,接线方式见图 2-2。

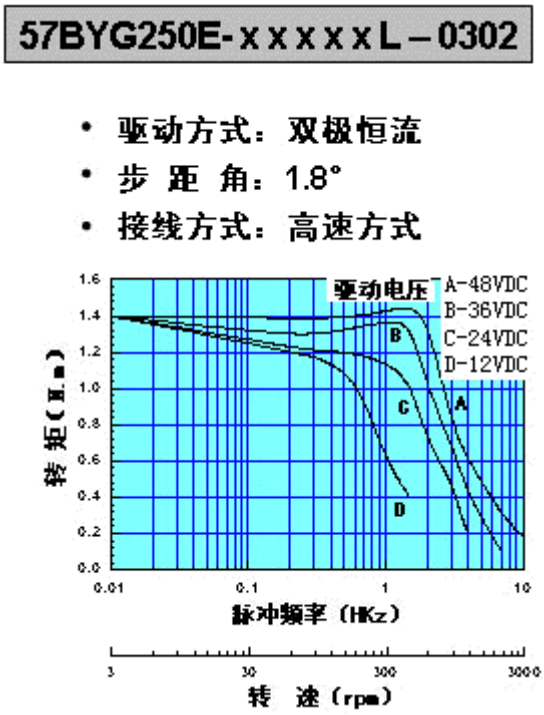


图 2-1 步进电机矩频特性曲线

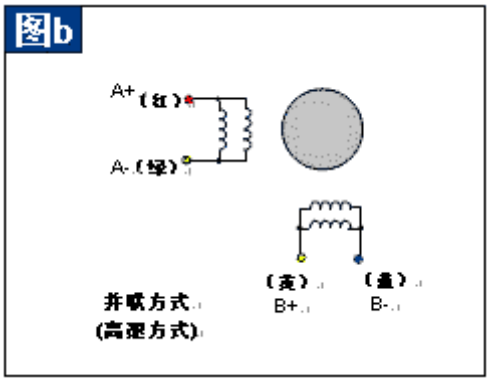


图 2-2 步进电机接线图

GXY 系列伺服平台选用的交流伺服电机为松下 MINAS A4 系列交流伺服电机。角度传感器为光电码盘，直接安装在电机转子上，与配套提供的驱动器构成闭环控制系统,提供位

置控制、速度控制和转矩控制三种控制方式（通过驱动器参数设定，并修改相应联线）。以 GXY-2020 为例 配用电机型号为 MSMD022P1U，该电机为小型小惯量电机，配 11 线 2500P/r 增量式编码器，功率：200W，额定转速：3000r/min，额定转矩：0.64Nm，最大转矩 1.91Nm。电机匹配驱动器为 MADDT1207 型驱动器。驱动器内有各种参数，借助这些参数可以调整或设定驱动器的性能或功能。关于参数的说明和设定方法请参见《Technical reference AC Servo Motor & Driver MINAS A4-series》。

2.4 实验步骤

危 险	**在下列实验过程中，切勿带电插拔任何电缆！**

利用 GXY 系列平台，在实验时将电机与传动丝杆脱开（松开联轴器）。对步进驱动系统，进行电机与驱动的接线、步进电机调速、最高启动频率测定、正反转、脉冲当量测定等实验；对交流伺服驱动系统，进行伺服驱动器组合和接线、基本操作、速度环调整、位置环调整、自动调整、数字控制等实验。

步进电机控制实验

1. 松开联轴器，将电机与传动丝杠脱开。
2. 打开电控箱。
3. 根据步进电机接线图和步进驱动器接口说明检查步进电机和驱动器的连接方式。
4. 进入 SG 卡调试窗口，根据运动控制卡演示软件使用说明进行电机调速实验：在 T 曲线下，调整速度和加速度，观测步进电机对这两个参数的响应，理解步进电机主要参数特性（最大空载启动频率、空载运行频率（最大响应频率）等）在运行过程中的具体体现，并对电机的脉冲当量进行测定。

交流伺服系统位置控制实验

1. 松开联轴器，将伺服电机与传动丝杠脱开，同时打开电控箱盖。
2. 根据主回路接线原理图（图 2-3）检查安装在电控箱内的驱动器的各连接电缆，记录驱动器各个接口的名称和符号，以及与这些接口连接的电缆和部件。
3. 给电箱上电，用 JOG 功能（只有电机和驱动器在运转）进行试运行。试运行完毕后，给电控箱断电。
4. 将驱动器 CN I/F 口与 GT-400 控制器接口（端子板，安装在电箱后盖上）之间连接电缆拔下，对照接线图(图 2-4)检查该电缆的连接方式和插头之间的信号对应关系。重新安装好电缆，给电控箱上电。注意：切勿带电插拔！
5. 设置控制方式为位置控制方式：按“ SET ”切入参数设定，将“ PA 02 ”参数设置成“ 0 ”；
6. 将“ PA 42 ”参数设置成“ 3 ”；并把所设参数保存到 EEPROM 中。
7. 按照《Panasonic 交流伺服电机驱动器 MINAS A 系列使用说明书》P58 页的步骤对电机进行“ 常规自动增益调节 ”。
8. 从控制器（通过 PC）送一个位置脉冲信号到驱动器，使电机运行在低速，核查当指令停止时，电机是否停止在目标位置。

9. 采用 GT-400-SG 控制器界面对电机进行数字控制测试。其中脉冲控制按“ D 模式 ”控制。

说明：将“ PA 42 ”参数设置成“ 1 ”时；运动控制卡的脉冲控制按“ P 模式 ”控制。

交流伺服系统速度控制实验

1. 将计算机断电，将 GT-400-SV 控制卡插到计算机中，进行相应电缆连接。给计算机上电。
2. 将驱动器 CN I/F 口与 GT-400 控制器接口（端子板，安装在电箱后盖上）之间连接电缆拔下，对照接线图（图 2-5）检查该电缆的连接方式和插头之间的信号对应关系。重新安装好电缆，给电控箱上电。
3. 设置控制方式为速度控制方式：按“ SET ”切入参数设定，将“ PA 02 ”参数设置成“ 1 ”；
4. 并把所设参数保存到 EEPROM 中。
5. 在开环情况下，从控制器（通过 PC）送一个电压信号到驱动器，从 0 开始逐渐增加电压，观察电机转动和相应的速度变化。置指令电压为 0，看电机是否停止。
6. 按照《Panasonic 交流伺服电机驱动器 MINAS A 系列使用说明书》P58 页的步骤对电机进行“ 常规自动增益调节 ”。
7. 采用 GT-400-SV 控制器界面对电机进行闭环控制测试。

说明:将一个 0 电压信号到驱动器时，若电机仍在转动，则说明有零漂，要设置驱动器的“ PA 52 ”参数，直至发一个 0 电压信号到驱动器时，电机不转。

说明：在闭环有零漂，可用 GT_SetMtrBias()函数设置输出零点偏移值。

注意事项：

1、 对电机控制的接线要认真检查（每实验小组内部互查），确保接线无误。

2、 实验中电机必须与负载分离，进行空载实验。

3、 实验完成后，要尽量把驱动器原参数改回。并把硬件复位。

2.5 实验总结

1、根据实验结果等，进一步给出步进电机驱动和交流伺服驱动的特性和各自的应用场合。

2、指出步进电机的最大空载启动频率、空载运行频率等参数在电机运行中的体现，并计算出脉冲当量。

3、简述交流伺服驱动（位置、速度）两种控制方式的区别及其特点。并画出控制框图。

4、掌握简单交流伺服驱动器参数调整的方法，列出位置、速度两种控制方式的主要参数。

第3章　直流伺服电机速度环阶跃法辨识实验

3.1　实验目的

了解直流伺服电机原理、使用特性和常用驱动技术，理解直流伺服电机的数学模型及其建立方法，掌握阶跃飞升法进行系统辨识的方法。

3.2　基础知识

进行本章实验前，请先仔细阅读并充分理解本节内容。

3.2.1 直流伺服电机概述

直流伺服电机构造与普通直流电机一样，由磁极、电枢绕组、电刷和换向器组成。其基本工作原理与普通直流电机一样。

现代直流电机的驱动放大大都是采用晶体管功率放大器来实现。晶体管放大器系统可分为线性放大器和开关放大器两种类型。线性放大器一般在小功率的场合有所应用，而大量采用的是开关型放大器。开关型放大器通常分为三种：脉宽调制（PWM）、脉冲频率调制（PFM）和可控硅整流（SCR）。

在运动控制系统中，需要对电机的转矩、速度和位置等物理量进行控制。因此，从控制的角度来看，对直流电机驱动及其控制过程有电流反馈、速度反馈和位置反馈等控制形式。图 3-1 所示为使用了三个反馈控制回路（电流环、速度环和位置环）的运动控制系统方框图。

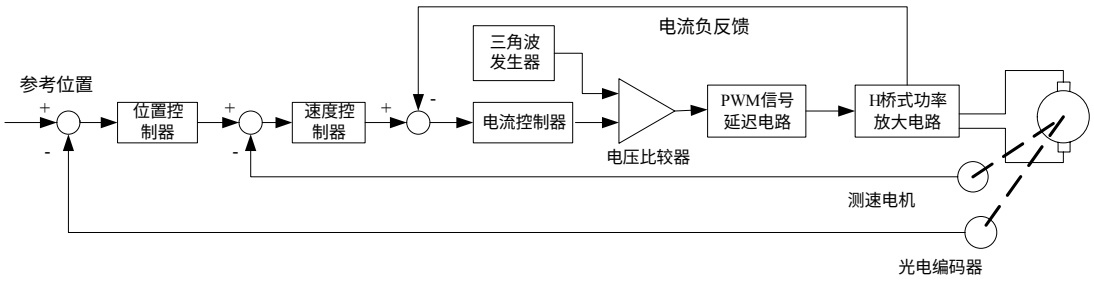


图 3-1　直流电机三闭环控制系统

其中，电流环的作用是通过调节电枢电流控制电机的转矩，并改善电机的工作特性和安全性。

3.2.2 直流伺服电机模型

如图 3-2 所示，为直流伺服电机采用电枢电压控制时的电枢等效电路。

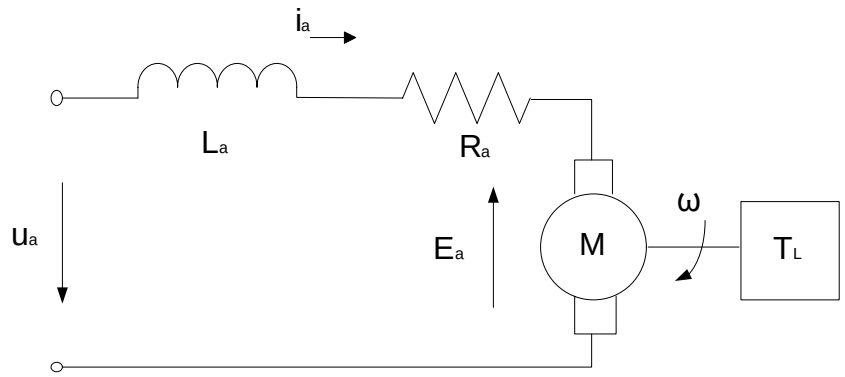


图 3-2 直流电机电枢电压控制时的等效电路

其中，L_a和R_a分别是电枢绕组的电感和电阻，T_L为负载转矩。当电枢绕组流过直流电流i_a时，一方面在电枢导体中产生电磁力，使转子旋转；另一方面，电枢导体在定子磁场中以转速ω旋转切割磁力线，产生感应电动势E_a，感应电动势E_a的方向与电枢电流方向相反，即反电动势，其大小与转子旋转速度和定子磁场中的每极气隙磁通量有关，表达式如下：

$$\omega = \frac{k_1(u_a - i_a R_a)}{\phi}$$

式中K_1为比例系数，仅与电机结构有关。

当忽略掉电枢绕组上的压降时，上式可写为：

由于直流伺服电机通常都是采用永磁式，所以定子磁场中的磁通量始终保持常量，从而使得转速与电压之间为线性关系，即电机转速仅随电枢电压变化而变化。

为了获得正确的直流电机数学模型，可根据电磁学原理和物理学原理得出以下方程：

电压平衡方程　$u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t)$

感应电动势方程　$E_a(t) = K_e \omega$

电磁转矩方程　$T(t) = K_t i_a(t)$

转矩平衡方程　$T(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) + T_d(t)$

其中，J、B分别为等效到电机控制轴上的转动惯量和阻尼系数，K_e、K_t分别为感应电动势系数和电磁转矩系数，$T_d(t)$为电机空载转矩和负载等效到电机轴上的转矩之和。

为了把输入/输出关系式写成传递函数形式，需要对各个方程进行拉普拉斯变换，得到如下代数方程组：

$$\begin{cases} U_a(s) = R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + E_a(s) \\ E_a(s) = K_e \Omega(s) \\ T(s) = K_t I_a(s) \\ T(s) = Js\Omega(s) + B\Omega(s) + T_d(s) \end{cases}$$

消除中间变量后，可以得到以电枢电压为输入变量，电机转速为输出变量的传递函数为：

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)}=\frac{K_t}{L_aJs^2+(L_aB+R_aJ)s+R_aB+K_eK_t}$$

上式是直流电机速度控制系统精确的输入/输出关系式。可以看出，它是一个二阶系统。实际上，由于 $L_a << R_a$，电机的电磁时间常数 $\tau_a = L_a / R_a$ 极小，即可以忽略电枢电感 La，同时可以不考虑粘性阻尼系数 B 的影响，则直流电机速度控制系统的传递函数可以近似为一个一阶惯性环节：

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)}=\frac{1/K_e}{T_ms+1}$$

其中，T_m 为电机时间常数：

$$T_m=\frac{R_aJ}{K_eK_t}$$

速度信号经过积分就可以得到位置（角度）信号，所以在开环速度系统后串联一个积分环节就可以得到开环的位置系统的传递函数：

3.2.3 一阶系统的阶跃辨识（飞升法）原理

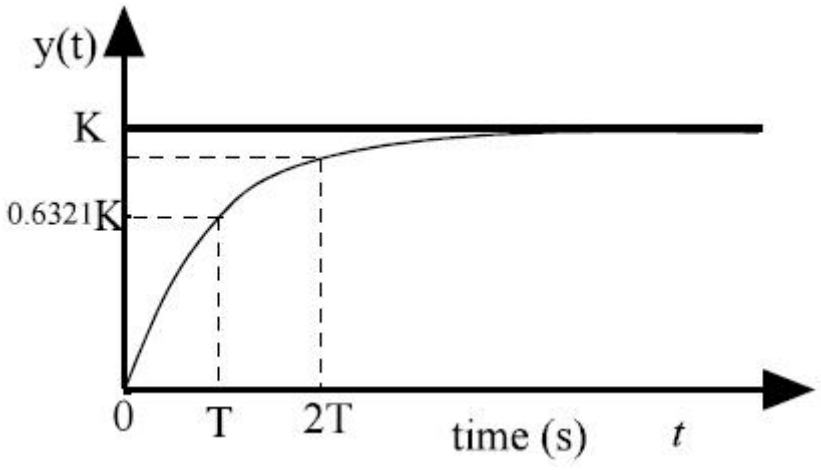
设一简单系统的传递函数为：

$$G(s)=\frac{K}{TS+1}$$

则其单位阶跃响应时域公式为：

$$y(t)=K(1-e^{-\frac{t}{T}})$$

而对应的响应过程如图所示：



从图中可知，

$$K=y(t\to\infty)$$

所以可取响应稳态值为 K 值，如果 t=T，则：

$$y(t)|_{t=T} = K(1-e^{\frac{t}{T}})|_{t=T} = k(1-e^{-1}) = 0.6321K$$

所以，只要在曲线上找到纵坐标为 0.6321K 的点，则其横坐标即为 T 的值。这就是简单系统的阶跃参数辨识法。

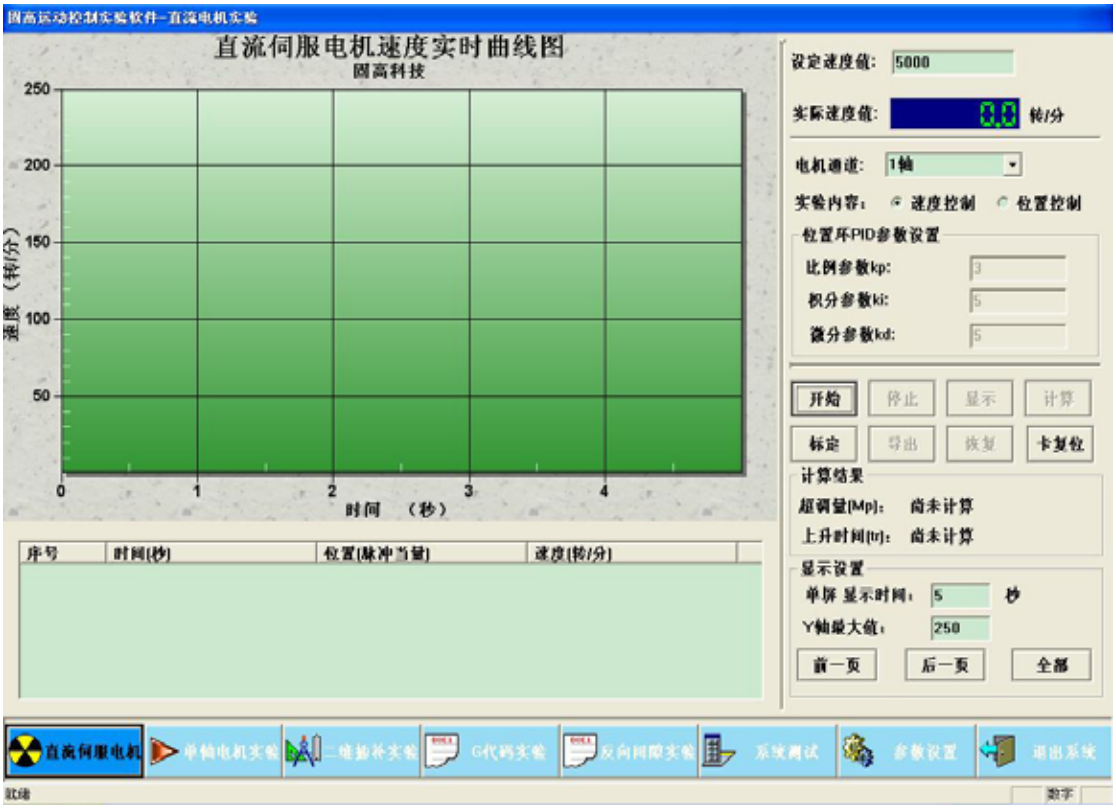
3.3 实验设备

- 直流伺服线性模块或直流伺服 XY 平台一套
- GT-400-SV 卡一块
- PC 机一台
- 实验用工具一套

3.4 实验步骤

重要	本章所涉及的实验内容，只适用于使用直流伺服电机为执行元件的线性运动模块或 XY 平台

1. 按下电控箱上绿色“ 系统上电 ”按钮，使实验平台上电；
2. 双击电脑桌面上的“ MotorControlBench.exe ” 图标，打开运动控制平台实验软件，点击界面下方 按钮，进入如下图所示界面；



3. 在实验内容中选择“ 速度控制 ”，在设定速度中输入合适的阶跃信号的幅值（该值的输入范围为-32767~32767），例如输入 5000，在显示设置中设置合适的 Y 轴最大值；
4. 点击界面中“ 开始 ”按钮，平台上电机开始运动，运行一段时间后，点击“ 停止 ”按钮停止电机运动；
5. 点击“ 显示 ”按钮，界面左侧将显示电机速度阶跃响应曲线和数据；
6. 点击“ 导出 ”按钮，系统阶跃响应输出数据将自动保存到 record.mat 文件中；
7. 将 record.mat 文件复制到“ 平台 MATLAB 辨识程序 ”目录下；
8. 在 MATLAB 中运行“ iden1order.m ”文件，得到电机开环速度系统的阶跃响应曲线，并在 MATLAB 主界面中输出 K 和 T 的一组参数；
9. 关闭实验平台电源，实验完毕。

3.5 实验要求及总结

1) 根据电枢控制式直流电机原理图，利用拉氏变换推导出直流电机的速度控制和位置控制传递函数并作简化；
2) 观察电机系统的正向阶跃响应，求得参数 K 和 T 值；
3) 计算位置系统的完整传递函数，分析系统的稳定性。

第4章　直流伺服电机位置环 PID 调整实验

4.1　实验目的

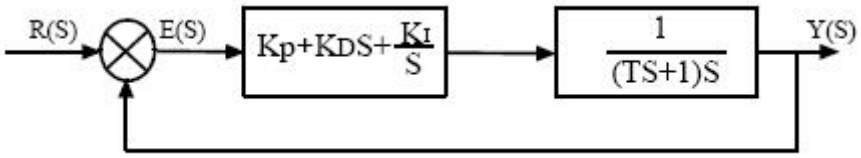
学会使用数字式 PID 控制器；熟悉用试探法调节 PID 控制器参数的过程。

4.2　实验原理

4.2.1 数字式 PID 控制器

一般来说，位置系统的瞬态特性和稳态特性均不能令人满意，必须在系统中加入适当的校正装置来改造系统的结构。本实验中，通过使用在系统的前向通道中串联一个 PID 控制器来改善系统的性能。

加入 PID 控制器校正以后的位置系统框图如下。



模拟式 PID 的控制算法：

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_I}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_D\frac{de(t)}{dt}]$$

其中，u（t）,e(t)分别是控制器的控制量输出和系统的跟随误差，K_P，T_I，T_D分别是比例系数，积分时间和微分时间。离散化后得到数字式的PID控制算式：

$$u(k) = K_P\{e(k) + \frac{T}{T_I}\sum_{i=0}^{k}e(i) + \frac{T_D}{T}[e(k)-e(k-1)]\} = K_P e(k) + K_I\sum_{i=0}^{k}e(i) + K_D[e(k)-e(k-1)]$$

其中，K_I，K_D分别是积分系数和微分系数。由于计算机适合计算增量式的算式，推导可得如下的增量式形式：

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

$$\Delta u(k) = K_P[e(k)-e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)]$$

以上形式是控制程序中实现的 PID 控制算法形式。

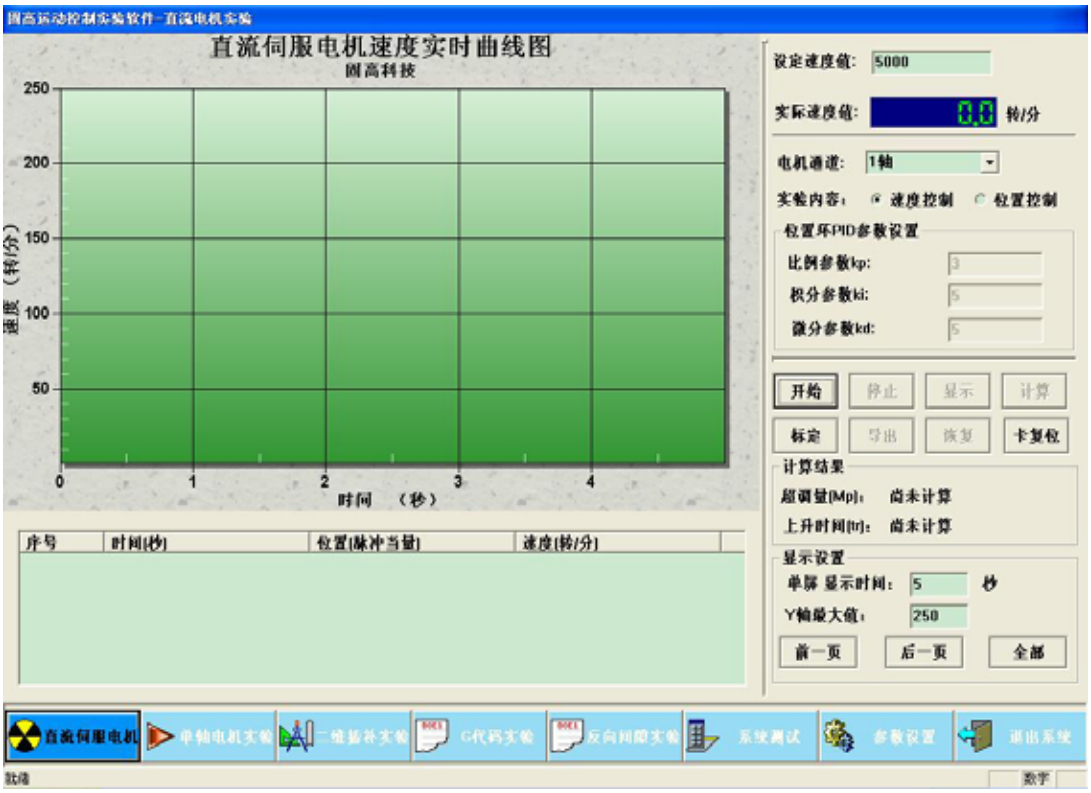
对 PID 控制参数的调节一般在一定的准则下采取现场调试的方法，在 PID 控制的三个组成部分中，比例项的作用是对偏差信号做出及时响应；微分项的作用是减少超调，提高系统的稳定性，改善系统的动态特性；积分项的作用是消除静差，提高控制精度，改善系统的稳态特性。在实际调试时可以先选取一组 PID 参数初值，然后根据实际系统的控制情况对参数进行调节，一般在经过几次调节以后均能得到较好的控制效果。

4.3 实验设备

- 直流伺服线性模块或直流伺服 XY 平台一套
- GT-400-SV 卡一块
- PC 机一台

4.4 实验步骤

1. 按下电控箱上“ 系统上电 ”按钮，使实验平台上电；
2. 双击桌面“ MotorControlBench.exe ” 图标，打开运动控制平台实验软件，点击界面下方 按钮，进入如下图所示界面；



3. 电机通道选择“ 1 轴 ”，在实验内容中选择“ 位置控制 ”，此时界面内容将发生变化，在设定位置值处中输入位置控制的目标值（单位为当量脉冲数，建议输入范围在 0~50000），例如如输入 40000；
4. 在位置环 PID 参数设置栏中输入一组 PID 控制器参数的初值；
5. 点击界面中“ 开始 ”按钮，平台上电机开始运动，待轴运动一段时间后，点击“ 停止 ”按钮停止电机运动；
6. 点击“ 显示 ”按钮，界面右侧将显示电机位置阶跃响应曲线和数据；

7. 观察位置阶跃响应曲线；
8. 点击“计算”按钮，观察计算结果中的超调量和上升时间；
9. 根据结果调整 PID 参数，反复执行 4~8 步，直到获得性能满意的阶跃响应曲线。
10. 关闭实验平台电源，实验完毕。

参照 4.2.2 中数字式 PID 控制器的程序实现的相关说明，学生可以在软件中自行编写 PID 控制函数（仅限于有源代码使用权限的用户）。

具体步骤如下：

1. 在 VC 中打开源代码文件夹中的 MotorControlBench.dsw 文件；
2. 在 class view 选项卡中找到 CDCMotorCtrlWnd 类中的 int PID_Control(void)函数；
3. 将原有函数注释掉，在其中自行编写 PID 控制函数；
4. 重新编译和构建程序；
5. 运行程序

学生也可以利用 VC 开发环境自行开发，进行直流伺服电机位置环 PID 控制的软件实现实验。

以最典型的 VC 为例，完成实验需要用到以下文件：

GT400.lib——运动控制器库文件

GT400.dll——运动控制器函数的动态链接库文件

GT400SV.h or GT400SG.h——运动控制器头文件

以上文件位于“*\GT-400-SV-PCI\T4VP-CD-020626\Windows\DLL-1.5*”中。

动态链接库函数调用方法请参考《GT 系列运动控制器编程手册》。

4.5 实验总结

1、 根据实验现象，分析 P、I、D 各个环节对系统的控制作用；
2、 根据数字 PID 的算法，完成数字 PID 的软件实现；
3、 详细记录实验步骤，完成实验报告

第5章　运动控制器的调整－PID 控制器的基本控制作用

5.1　实验目的

了解数字滤波器的基本控制作用，掌握调整数字滤波器的一般步骤和方法，调节运动控制器的滤波器参数，使电机运动达到要求的性能。

5.2　基础知识

目前大多数工业控制器内起核心控制作用的通常是一个滤波器，该滤波器包含了几个基本的控制作用：比例控制作用、微分控制作用和积分控制作用。控制器将这几个基本控制作用进行组合，就构成了各种类型的控制器，图 5-1 所示为 PID 控制器。

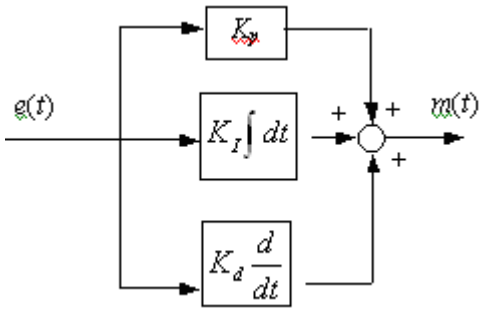


图 5-5-1 PID 控制器

运动控制器通常是一个数字控制器，因此其核心通常是一个数字滤波器。除了上面提到比例、积分和微分控制作用外，许多运动控制器还包含有速度前馈和加速度前馈等控制作用。

比例控制器实质上就是一种增益可调的放大器。

在具有积分控制作用的控制器中，控制器的输出量 u(t)的值，是与作用误差信号 e(t)成正比的速率变化的。积分控制器表示成拉普拉斯变换量的形式为：U(s)/E(s)=Ki/s。如果 e(t)的值加倍，则 u(t)的变化速度也加倍，当作用误差信号为零时，u(t)的值将保持不变。积分控制作用有时也称为复位控制。

微分控制作用是控制器输出中与作用误差信号变化率成正比的那一部分，有时又称为速率控制。微分控制作用具有预测的优点，但同时它又放大了噪声信号，并且还可能在执行器中造成饱和效应。微分控制作用不能单独使用。

通过将上述三种基本控制作用进行组合，可以得到不同类型的控制器，目前在工业界经常采用的有比例加积分(PI)控制器，比例加微分（PD）控制器和比例加积分加微分（PID）控制器等。

5.3　实验设备

- 交流伺服 XY 平台一套
- GT-400-SV 卡一块
- PC 机一台
- 实验用工具一套

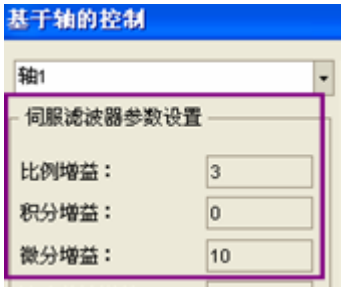
5.4 实验步骤

重要	本章所涉及的实验内容，只适用于使用 SV 卡和交流伺服电机的线性运动模块或 XY 平台。

在 DEMO 测试软件中完成实验：

空载实验：

1. 首先进入运动控制卡测试软件，按说明书调节 P 参数，刷新参数后，给电机上伺服，逐步加大 P 参数，直到电机发生激烈震荡，即断伺服，将 P 参数稍微调小，再上伺服，直到电机不发生颤震；保持 P 参数，用同样的方法调整 I 参数；保持 P、I 参数，用同样的方法调整 D 参数。



2. 单独采用 P 控制器进行点位控制，观测平台的响应过程；然后分别采用 PI 控制器，PD 控制器和 PID 控制器对平台进行点位控制，观测平台的响应过程。

带负载实验：

1. 首先人为地给电机轴加上一个负载，进入运动控制卡测试软件，按说明书调节 P 参数，刷新参数后，给电机上伺服，逐步加大 P 参数，直到电机发生激烈震荡，即断伺服，将 P 参数稍微调小，再上伺服，直到电机不发生颤震；保持 P 参数，用同样的方法调整 I 参数；保持 P、I 参数，用同样的方法调整 D 参数。
2. 单独采用 P 控制器进行点位控制，观测平台的响应过程；然后分别采用 PI 控制器，PD 控制器和 PID 控制器对平台进行点位控制，观测平台的响应过程。

在运动控制平台实验软件中完成实验：

步骤如下：

1. 松开 XY 平台各电机轴与丝杠间的联轴器,使 XY 平台处于不加负载的工作状态;
2. 检查系统电气连线是否正确，确认后，给实验平台上电；
3. 双击桌面“ MotorControlBench.exe” 按钮，进入运动控制平台实验软件，

点击界面下方 按钮，进入如图所示界面；

4. 选取实验电机，例如选取“ 1 轴 ”即实验平台中的 X 轴为当前轴；
5. 电机控制模式栏将根据实际电机的配置情况自动设置，“ 脉冲量”表示控制信号为脉冲信号，“ 模拟电压 ” 表示控制信号为模拟电压；
6. 设置位置环 PID 参数，PID 参数在电机控制模式为“ 模拟电压 ”下有效，“ 脉冲量” 下无效。为了防止电机震动，调节参数 Kp 时应在教师指导下逐步增大；
7. 选择速度规划模式为 S 曲线模式；
   GT-400-SV 运动控制器具有两种速度规划曲线：T 形曲线和 S 形曲线，在 T 形曲线模式下设置加加速度无效。
8. 在 S 曲线模式参数输入页面中设置各运动参数；
   参考设置如图所示：

9. 在教师指导下，设置 PID 参数值；
   参考设置如图所示：

10. 将采集数据类型设置为实际值；
11. 点击“开启轴”按钮，将 PID 参数载入运动控制器中，点击“运行”按钮，电机开始转动。同时程序读取板卡对编码器采样得到的数据，位于程序界面左侧的绘图区域中的三个坐标轴分别显示采集到的实际位置，速度，加速度；

重要	图形绘制功能并非适用于所有板卡，当所用板卡（如 SG 卡和低版本 SV 卡）不支持图形绘制功能时，界面中将会出现相关提示。

12. 单轴运动停止。用户设置运动停止后，程序停止读取采样数据，显示曲线不再更新；
13. 运动完成后，可将采集数据或图形保存(具体操作方法见软件使用说明书)；
14. 逐步增大 Kp 参数值，重复执行第 11 步，直到电机发生震颤， 观察平台的响应情况及绘图区域中的显示图形；
15. 电机发生震颤，即断伺服，将 P 参数稍微调小，再上伺服，直到电机不发生颤震；
16. 分析并理解 Kp 参数对电机运行的影响；
17. 在教师指导下，改变 Ki 和 Kd 的值，观察平台的响应情况；
18. 分析理解 Ki 和 Kd 参数对电机运行的影响；

运行示例：

设置 PID 参数为 Kp=5, Kd=0, Ki=0, 控制电机得到以下运行结果：

19. 设置 PID 参数为 Kp=25, Kd=0, Ki=0, 控制电机得到以下运行结果：

注 意	调整 PID 参数时应从小到大逐步调整。出现超调（颤震）时应尽快断掉伺服。

5.5 实验总结

4、 分析 P、I、D 各个环节对系统的控制作用；

5、 给出 GT400-SV 运动控制卡调节数字滤波器的一般步骤。

6、 详细记录实验步骤，完成实验报告。

第6章　单轴电机运动控制实验

6.1 实验目的

理解运动控制系统加、减速控制的基本原理及其常见实现方式（T 曲线模式、S 曲线模式），理解电子齿轮的相关概念和应用范围，掌握实现单轴运动各种运动模式的方法和设置参数的含义。

6.2 基础知识

6.2.1 加减速控制

加、减速控制是运动控制系统插补器的重要组成部分，是运动控制系统开发的关键技术之一。

常见的加、减速控制方式有直线加减速（T 曲线加减速）、三角函数加减速、指数加减速、S 曲线加减速等。其中，在运动控制器中应用最广泛的为直线加减速和 S 曲线加减速算法。

1、直线加减速（T 曲线加减速）算法

如图 6-1 所示，当前指令进给速度V_{i+1}大于前一指令进给速度V_i时，处于加速阶段。瞬时速度计算如下：

$$V_{i+1}=V_i+aT$$

式中，a为加速度；T为插补周期。此时系统以新的瞬时速度V_{i+1}进行插补计算，得到该周期的进给量，对各坐标轴进行分配。这是一个迭代过程，该过程一直进行到V_i为稳定速度为止。

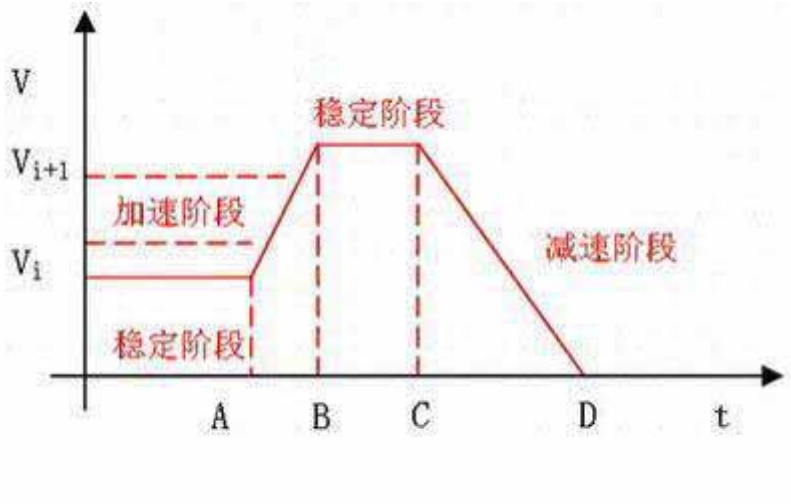


图 6-1 直线加减速

同理，处于减速阶段时：$V_{i+1}=V_i-aT$。此时系统以新的瞬时速度进行插补计算，这个过程一直进行到新的稳定速度为零为止。

这种算法的优点是算法简单，占用机时少，响应快，效率高。但其缺点也很明显，从图 6-1 中可以看出，在加减速阶段的起点 A、C，终点 B、D 处加速度有突变，运动存在柔性冲击。另外，速度的过渡不够平滑，运动精度低。因此，这种加减速方法一般用于起停、进退刀等辅助运动中。

2、S 曲线加减速算法

S 曲线加减速的称谓是由系统在加减速阶段的速度曲线形状呈 S 形而得来的，采用降速与升速对称的曲线来实现升降速控制。正常情况下的 S 曲线加减速如图 6-2 所示，

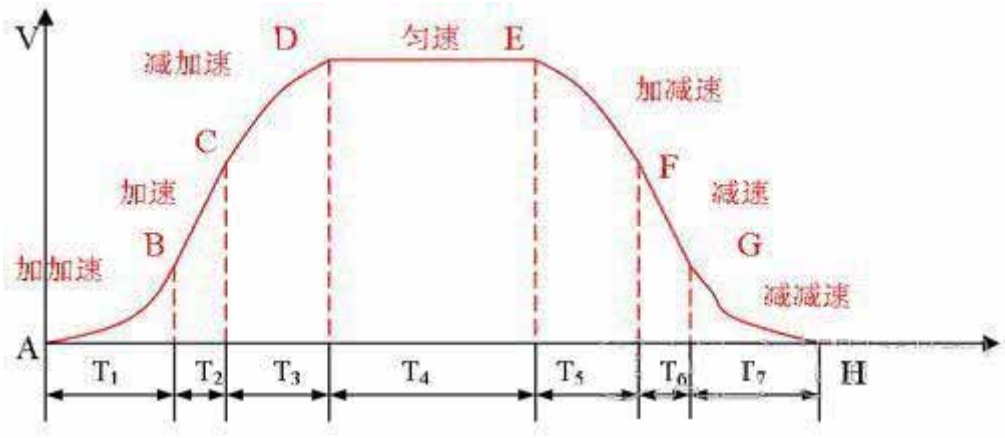


图 6-2 S 曲线加减速

以下给出 S 曲线加减速的插补递推公式，在此处设插补周期为 T，则在第 i 个插补周期结束时，位移为：$S_i=S_{i-1}+V_{i-1}T+\frac{1}{2}a_{i-1}T^2+\frac{1}{6}JT^3$ 加速度为：$a_i=a_{i-1}+\frac{1}{3}JT$；速度为：$V_i=V_{i-1}+\frac{1}{2}a_iT$

上述递推公式中 J 是分区适应的，即：

$$J=\begin{cases} J, & t\in T_1\cup T_7 \\ 0, & T\in T_2\cup T_4\cup T_6 \\ -J, & t\in T_3\cup T_5 \end{cases}$$

插补时只需判断当前插补周期所在区间，即可按插补迭代公式计算出与速度规划适应的位移增量，从而实现其加减速。

S 型加减速在任何一点的加速度都是连续变化的，从而避免了柔性冲击，速度的平滑性很好，运动精度高。但是算法较复杂，一般用于高速、高精度加工中。

6.2.2 电子齿轮

电子齿轮模式实际上是一个多轴联动模式，其运动效果与两个机械齿轮的啮合运动类似。电子齿轮可以实现多个运动轴按设定的齿轮比同步运动。另外，电子齿轮功能还可以实现一个运动轴以设定的齿轮比跟随一个函数，而这个函数由其他的几个运动轴的运动决定；

一个轴也可以以设定的比例跟随其他两个轴的合成速度。

实验中采用的运动控制器允许一个主动轴带多个从动轴,或者从动轴作为主动轴再带动从动轴运动的情况。但是由于本实验的控制对象 XY 平台只有两个轴，所以，本实验中只进行两个轴的电子齿轮设置。

6.3 实验设备

- XY 平台一套
- GT-400-SV 卡或 GT-400-SG 卡一块（由实验平台类型决定）
- PC 机一台

6.4 实验步骤

重要	当采用步进平台进行下列实验时，应注意电机加速度和速度值不宜设置过大，否则有可能由于步进电机启动频率过高，导致失步。

6.4.1 T 曲线、S 曲线运动模式实验

1. 检查实验平台电气是否正常；
2. 确认正常后，按下电控箱上“ 系统上电 ”按钮，使实验平台上电；
3. 双击桌面“ MotorControlBench.exe ” 图标，打开运动控制平台实验软件，点击界面下方 按钮，进入单轴运动控制实验界面；
4. 在电机选择栏中，选择“ 1 轴 ”为当前轴，电机控制模式栏将根据实际电机的配置情况自动设置，“ 脉冲量”表示控制信号为脉冲信号，“ 模拟电压 ”表示控制信号为模拟电压；
5. 在控制模式选项卡中点击“ S 曲线模式 ”，设置 S 曲线模式参数；
   参考设置如下图所示:

6. 将采集数据类型设置为规划值；

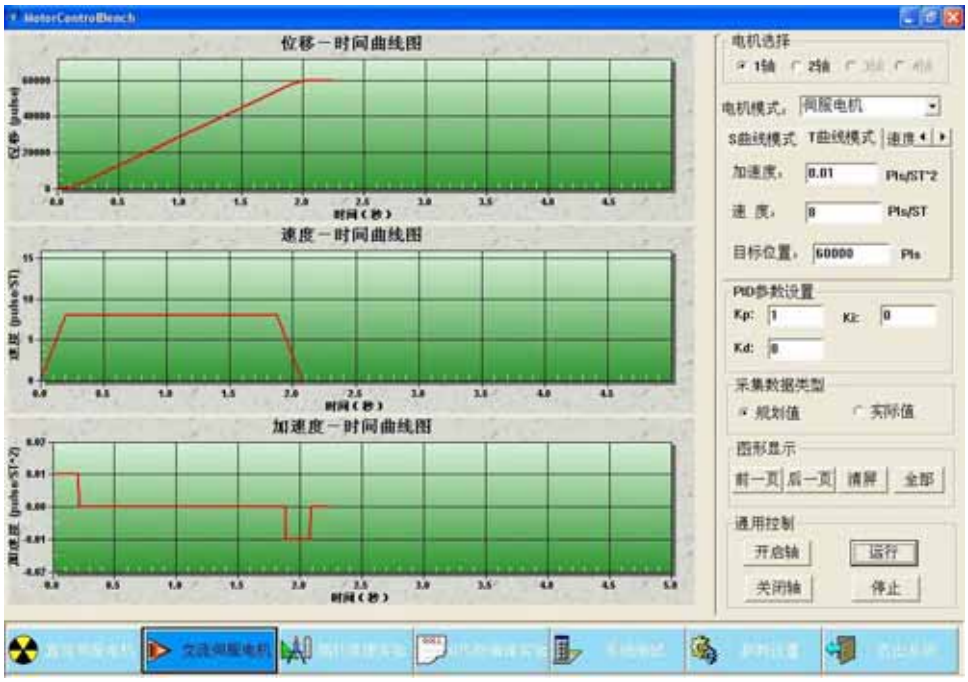
7. 点击 开启轴 按钮，使电机伺服上电；
8. 确认参数设置无误后，点击 运 行 按钮，此时将观察到运动控制平台上电机开始运动；
9. 单轴运动停止后，观察界面左侧显示区中电机运行速度、加速度及位移曲线，结合基础知识中的内容理解并分析 S 曲线运动模式的特点；
10. 运动完成后，将图形数据保存（具体操作方法见软件使用说明书）；
11. 在教师指导下，合理改变加加速度和加速度参数值，运行电机。观察并分析不同参数设置对 S 曲线运动模式的影响；
12. 保持其他设置不变，在控制模式选项卡中点击“ T 曲线模式 ”，进入 T 曲线运动模式，设置 T 曲线模式；

    T 曲线运动模式的运动参数参考设置如下图所示。

13. 确认参数设置无误后，点击 运 行 按钮，单轴开始以 T 曲线模式运动；
14. 单轴运动停止后，观察左侧显示区中电机运行速度、加速度及位移曲线；结合基础知识中的内容理解并分析 T 曲线运动模式的特点；
15. 在教师指导下，分别改变加速度和速度值，运行电机。观察并分析不同参数对 T 曲线模式运行的影响；
16. 运动完成后，将图形数据保存（具体操作方法见软件使用说明书）；
17. 比较并分析 S 曲线模式和 T 曲线模式下，速度和加速度曲线的异同，理解 S 曲线和 T 曲线加减速的应用范围。

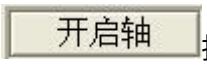
运行示例

如下两图所示，分别为 S 曲线模式和 T 曲线模式下的运行实例：

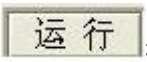


6.4.2 单轴速度控制模式运行实验

1. 松开 XY 平台各电机轴与丝杠间的联轴器,使 XY 平台处于不加负载的工作状态；
2. 在控制模式选项卡中点击“ 速度模式 ”，设置速度模式参数；
   参考设置如图所示：

3. 点击 

按钮，使电机伺服上电；

4. 确认参数设置无误后，点击 

按钮。电机开始转动，位于程序界面左边的绘图区域中的三个坐标轴分别显示采集到的实际速度，实际加速度以及当前位置数据；

5. 点击

按钮，停止电机运动；

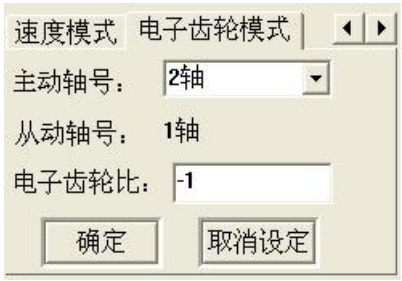
6. 单轴运动停止后，观测平台的响应过程；
7. 在教师指导下，分析理解速度运行模式的特点及应用场合。

6.4.3 电子齿轮模式运行实验

	进行本实验时，应严格按照实验步骤进行，否则有可能导致电子齿轮设置无效。

1. 在打开的运动平台演示软件中，点击界面下方 按钮，进入实验界面；
2. 在电机选择栏中，选择“ 1 轴 ”为当前轴，此轴将自动设置为电子齿轮中的从动轴；

3. 在控制模式选项卡中点击“ 电子齿轮模式 ”，设置电子齿轮模式参数；
参考设置如图中所示：



其中，从动轴号无须设置，它将根据电机选择中设定的当前轴号，自动更新。
参数设置完毕，点击“ 确定 ”，将设置的参数刷新；

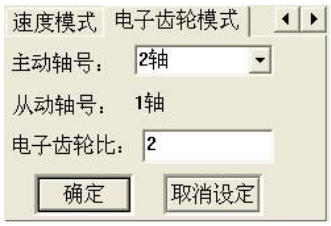
4. 在电机选择栏中，选择电子齿轮中设置的主动轴“ 2 轴 ”为当前轴；

5. 在控制模式选项卡中点击“ T 曲线模式 ”，设置主动轴“ 2 轴 ”的 T 曲线模式运动参数；
参考设置如图所示：

6. 点击 开启轴 按钮，使电机伺服上电；
7. 确认参数设置无误后，点击 运 行 按钮；
8. 观察并记录运动控制平台上各轴的运动；
9. 改变电子齿轮传动比；

   例如将电子齿轮传动比设置为 2，步骤如下：

   再次执行 2~8 步，将第 4 步中的电子齿轮传动比更改为 2；

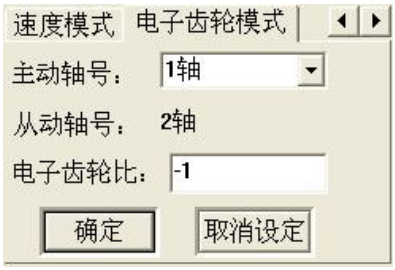


10. 观察并记录运动控制平台上各轴的运动情况；
11. 改变主动轴

    将主动轴设置为“ 1 轴 ”，步骤如下：

    a) 在电子齿轮模式页面中点击下图中的“ 取消设定 ”按钮，将原有的电子齿轮设置取消。

    b) 再次执行 2~9 步，其中第 2、4 步中设置的主动轴为“ 1 轴 ”，第 3 步中设定的电子齿轮参数设置如下图所示：



12. 观察并记录运动控制平台上各轴的运动情况；
13. 将以上步骤中观察到的电机运动情况记录在 表 6-1 中，比较不同设置时的运行情况，进一步理解电子齿轮的含义。

注 意	修改 PID 参数时应注意。出现超调（颤震）时应尽快断掉伺服。

表 6-1 电子齿轮实验记录表

实验序号	主 动轴号	从 动轴号	电子齿轮传动比	运行情况（转向、转速）
1	2 轴	1 轴	-1	
2	2 轴	1 轴	2	
3	1 轴	2 轴	-1	
4	1 轴	2 轴	2	

6.5 实验总结

1. 根据实验现象,分析 T 曲线和 S 曲线加减速模式的特点和应用场合；
2. 根据实验现象,分析速度控制模式的特点和应用场合；
3. 给出电子齿轮设置的一般步骤，填写表 5-1，查阅相关资料，指出两轴电子齿轮运行模式和两轴插补运行的异同；
4. 详细记录实验步骤，完成实验报告。

第7章　二维插补原理及实现实验

7.1 实验目的

掌握逐点比较法、数字积分法、数据采样法等常见直线插补、圆弧插补原理和实现方法；通过利用运动控制器的基本控制指令实现直线插补和圆弧插补，掌握基本数控插补算法的软件实现原理。

7.2　实验原理

直线插补和圆弧插补的计算原理。

数控系统加工的零件轮廓或运动轨迹一般由直线、圆弧组成，对于一些非圆曲线轮廓则用直线或圆弧去逼近。插补计算就是数控系统根据输入的基本数据，通过计算，将工件的轮廓或运动轨迹描述出来，边计算边根据计算结果向各坐标发出进给指令。

数控系统常用的插补计算方法有：逐点比较法，数字积分法，时间分割法，样条插补法等。

7.2.1 逐点比较法直线插补

逐点比较法是使用阶梯折线来逼近被插补直线或圆弧轮廓的方法，一般是按偏差判别、进给控制、偏差计算和终点判别四个节拍来实现一次插补过程。

以第一象限为例，取直线起点为坐标原点，如右图所示，m 为动点，有下面关系：

$$\frac{X_m}{Y_m}=\frac{X_e}{Y_e}$$

取 $F_m = Y_m X_e - X_m Y_e$　作为偏差判别式：

若　F_m=0，表明m点在OA直线上；

若 F_m>0，表明m点在OA直线上方的m＇处；

若　F_m<0，表明m点在OA直线下方的m＂处。

从坐标原点出发，当F_m≧0 时，沿＋X方向走一步，当F_m<0，沿＋Y方向走一步，当两方向所走的步数与终点坐标（X_e, Y_e）相等时，停止插补。

当F_m≧0 时，沿＋X方向走一步，则$X_{m+1}=X_m+1,\ Y_{m+1}=Y_m$

新的偏差为：$F_{m+1}=Y_{m+1}X_e- X_{m+1}Y_e=Y_mX_e-(X_m+1)Y_e$

$F_{m+1}=F_m-Y_e$

当F_m<0 时，沿＋Y方向走一步，则$X_{m+1}=X_m,\ Y_{m+1}=Y_m+1$

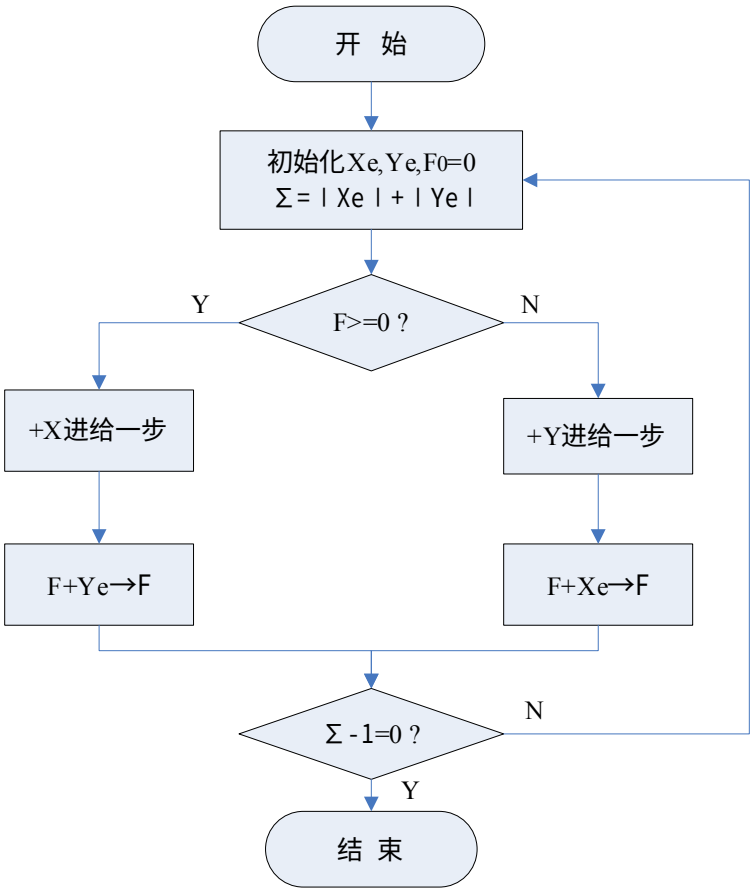
新的偏差为：$F_{m+1} =Y_{m+1}X_e- X_{m+1}Y_e=(Y_m+1)X_e-X_mY_e$

$F_{m+1}=F_m+X_e$

其它三个象限的计算方法，可以用相同的原理获得，下表为四个象限插补时，其偏差计算公式和进给脉冲方向，计算时，X_e, Y_e均为绝对值。

表 7-1 直线插补计算公式和进给脉冲方向

第一象限内直线的逐点比较法插补的流程图如下图所示：



L1逐点比较法插补流程图

7.2.2 逐点比较法圆弧插补

以第一象限逆圆为例，如下图所示。圆弧圆心在坐标原点，A为起点，B为终点，半径为R，假设运动瞬时点为m，它与圆心的距离为R_m，以R_m和R平方差作为偏差值，则偏差判别式为： $F_m = R_m^2 - R^2 = X_m^2 + Y_m^2 - R^2$

若 F_m=0，表明m点在圆弧上；

若 F_m>0，表明m点在圆弧外；

若 $F_m<0$，表明m点在圆弧内。

当$F_m \geq 0$ 时，为了逼近圆弧，应沿－X方向进给一步，到m+1 点，其坐标值为$X_{m+1}=X_m-1$, $Y_{m+1}=Y_m$，新偏差值为：

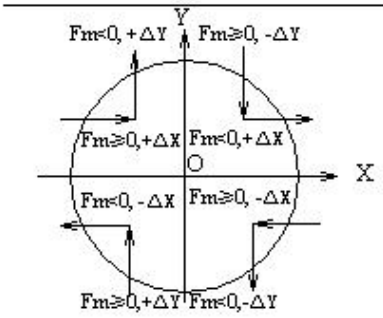
$$F_{m+1}=X_{m+1}^2-Y_{m+1}^2-R^2=F_m-2X_m+1$$

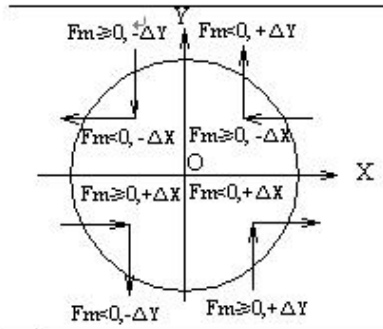
当$F_m<0$ 时，为了逼近圆弧，应沿＋Y方向进给一步，到m+1 点，其坐标值为$X_{m+1}=X_m$, $Y_{m+1}=Y_m+1$，新偏差值为：

$$F_{m+1}=X_{m+1}^2-Y_{m+1}^2-R^2=F_m+2Y_m+1$$

由上两式可得，只要知道前一点的偏差，就可求出新一点的偏差，而起点处的$F_m=0$ 是可知的。以上是第一象限逆圆的情况，其它情况可同理推导出来，表 6-2 为四个象限顺逆方向归纳的进给方向和偏差计算公式。

表 6-2 圆弧插补计算公式和进给脉冲方向



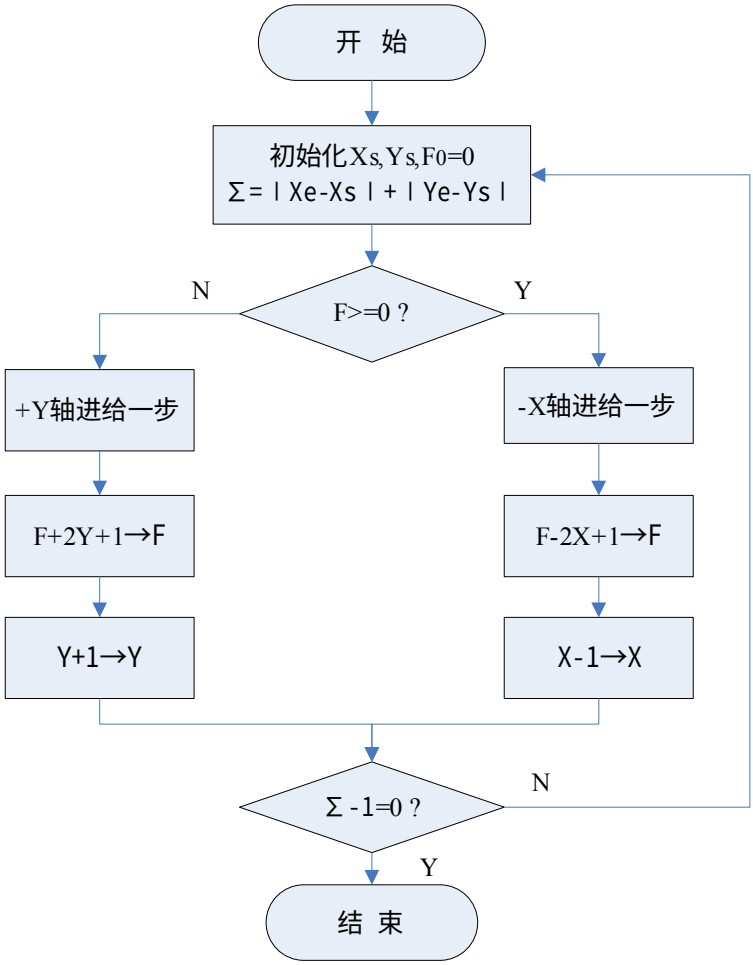


线型	Fm≥0时，进给方向	Fm＜0时，进给方向	偏差计算公式
SR1	-ΔY	+ΔX	$F_m \geq 0$ 时 $F_{m+1}=F_m-2Y_m+1$ $Y_{m+1}=Y_m-1$ $F_m<0$ 时 $F_{m+1}=F_m+2X_m+1$ $X_{m+1}=X_m+1$
SR3	+ΔY	-ΔX	
NR2	-ΔY	-ΔX	
NR4	-ΔY	+ΔX	
SR2	+ΔX	+ΔY	$F_m \geq 0$ 时 $F_{m+1}=F_m-2X_m+1$ $X_{m+1}=X_m-1$ $F_m<0$ 时 $F_{m+1}=F_m+2Y_m+1$ $Y_{m+1}=Y_m+1$
SR4	-ΔX	-ΔY	
NR1	-ΔX	+ΔY	
NR3	+ΔX	-ΔY	

圆弧插补的终点判别和插补计算过程和直线插补基本相同，但在偏差计算的同时，还要进行动点瞬时坐标值的计算，以便为下一点的偏差计算作好准备。

第一象限内圆弧的逐点比较法插补的流程图如下图所示。

采用基本点位运动控制指令进行直线和圆弧插补存在很大的局限性，为了满足工业应用的需求，需要开发高速插补算法。

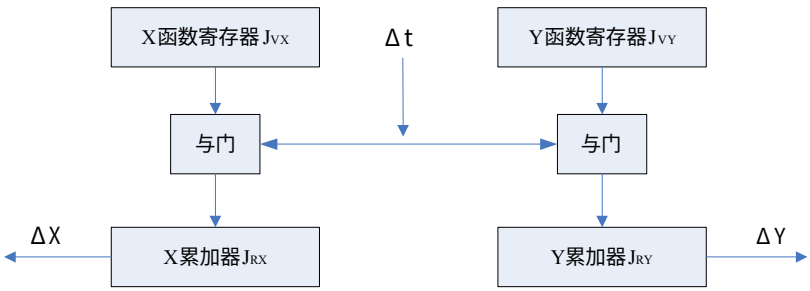


NR1逐点比较法插补流程图

7.2.3 数字积分法直线插补

数字积分法又称 DDA 法，它是通过被积函数的数字积分来实现插补控制的方法。这种方法容易实现多轴联动的插补，还易实现二次曲线，甚至高次曲线的插补。

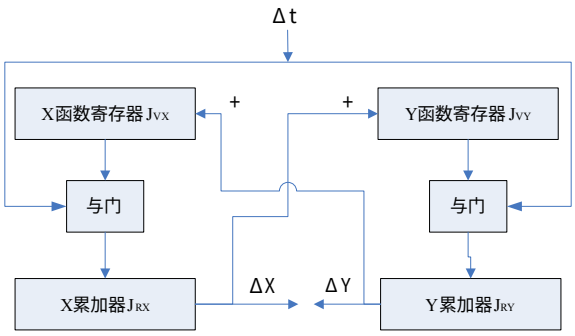
如下图所示为平面直线的插补框图，它由两个数字积分器组成，每个坐标轴的积分器由累加器和被积函数寄存器组成，被积函数寄存器存放终点坐标值，每经过一个时间间隔t，将被积函数值向各自的累加器中累加，当累加结果超过寄存器容量时，就溢出一个脉冲，若寄存器位数为n，经过 2^n次累加后，每个坐标轴的溢出脉冲总数就等于该坐标的被积函数值，从而控制刀具到达终点。



第一象限内直线的数字积分法插补流程图如下图所示：

7.2.4 数字积分法圆弧插补

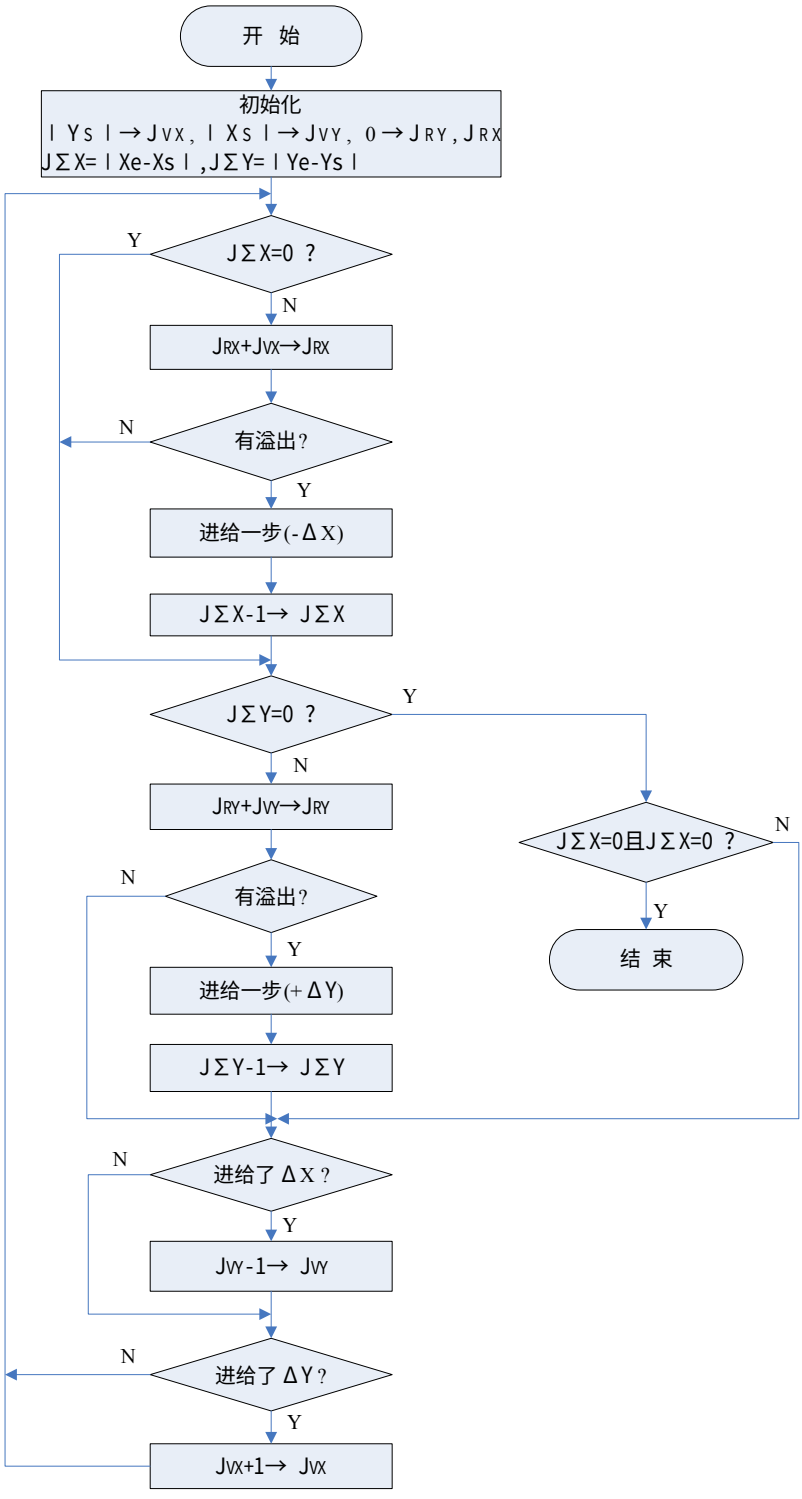
与 DDA 直线插补类似，DDA 圆弧插补也可用两个积分器来实现圆弧插补，如下图所示。



DDA 圆弧插补与直线插补的主要区别为：

1) 圆弧插补中被积函数寄存器寄存的坐标值与对应坐标轴积分器的关系恰好相反；
2) 圆弧插补中被积函数是变量，直线插补的被积函数是常数；
3) 圆弧插补终点判别需采用两个终点计数器。对于直线插补，如果寄存器位数为n，无论直线长短都需迭代 2^n次到达终点。

第一象限内圆弧的数字积分法插补流程图如下图所示。



NR1数字积分法插补流程图

7.2.5 数据采样法插补

数据采样法又称为“时间分割法”，是一种典型的二级插补计算方法，即粗插补和精插补。数据采样插补计算主要是指粗插补计算，其实质是利用一系列首尾相连的微小直线段来逼近给定曲线，基本计算过程分为插补准备与插补计算共两步。精插补则是在粗插补提供的微小直线段基础上，进一步插入与补充数据点，实施插补点的密化。

数据采样法的粗插补过程可按如下三步完成：

第一步，插补准备。将插补过程中可能用到的一些常量预先计算出来，为后续的插补运算做好准备。

第二步，插补计算。根据零件轮廓的类型作相应插补计算，一般需要计算出插补过程的一系列动点坐标以及相应的位置增量值，即X_i，Y_i，ΔX_i，ΔY_i四个值。这种插补计算在每一个插补周期中都要执行一次，并将计算结果输出给位置环控制软件使用，以控制刀具进给到该插补点处。

第三步，终点判断。在每一次插补计算完成后，都必须进行终点判别。数据采样法插补计算的终点判别条件为：$S_i=(X_i-X_e)^2+(Y_i-Y_e)^2\le(\frac{\Delta L}{2})^2$。

插补周期和位置控制周期是数据采样法插补中涉及到的比较重要的概念。所谓插补周期T_S，是指相邻两个微小直线段之间的插补时间间隔，所谓位置控制周期T_C，是指数控系统中伺服位置环的采样控制时间间隔。

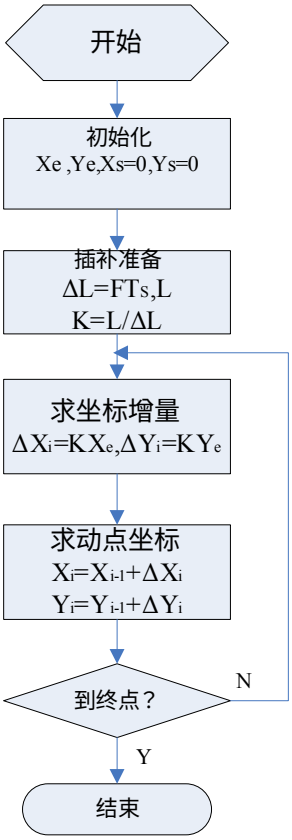
插补周期对系统稳定性没有影响，但对被加工轮廓的轨迹误差有影响。一般情况下，插补周期越长，插补计算误差就越大，但另一方面插补周期必须大于插补运算时间和完成其他相关任务所需时间的总和。

数据采样法插补直线和圆弧(NR1)轮廓的常用算法见表。

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">插补轮廓类型</td><td rowspan="2">插补准备</td><td colspan="2">插补计算</td></tr>
<tr><td colspan="2">坐标增量</td><td>动点坐标</td></tr>
<tr><td colspan="2">直线</td><td>$L=\sqrt{X_e^2+Y_e^2}$
$\Delta L=FT_S, K=\Delta L/L$</td><td colspan="2">$\Delta X_i=\frac{\Delta L}{L}X_e=KX_e$
$\Delta Y_i=\frac{\Delta L}{L}Y_e=KY_e$</td><td rowspan="3">$X_{i+1}=X_i+\Delta X_i$
$Y_{i+1}=Y_i+\Delta Y_i$</td></tr>
<tr><td rowspan="3">圆弧</td><td rowspan="2">内接弦线法</td><td rowspan="2">$\Delta L=FT_S$
$\Delta X_0=-\frac{Y_S}{R}\Delta L$
$\Delta Y_0=\frac{X_S}{R}\Delta L$</td><td>I区</td><td>$\Delta X_i=-\frac{\Delta L}{R}(Y_{i-1}+\frac{1}{2}\Delta Y_{i-1})$
$\Delta Y_i=-Y_{i-1}+\sqrt{R^2-(X_{i-1}+\Delta X_i)^2}$</td></tr>
<tr><td>II区</td><td>$\Delta Y_i=\frac{\Delta L}{R}(X_{i-1}+\frac{1}{2}\Delta X_{i-1})$
$\Delta X_i=-X_{i-1}+\sqrt{R^2-(Y_{i-1}+\Delta Y_i)^2}$</td></tr>
<tr><td>切线法</td><td>$\Delta L=FT_S$
$K=\frac{\Delta L}{R}$</td><td colspan="2">$\Delta X_i=-KY_{i-1}$
$\Delta Y_i=KX_{i-1}$</td><td></td></tr>
</table>

	割线法	$\Delta L = FT_S$ $K = \frac{\Delta L}{R}$ $K_1 = K^2$	$\Delta X_i = -KY_{i-1} - \frac{1}{2}K_1 X_{i-1}$ $\Delta Y_i = KX_{i-1} - \frac{1}{2}K_1 Y_{i-1}$	

如图所示，为数据采样法直线插补软件流程图。

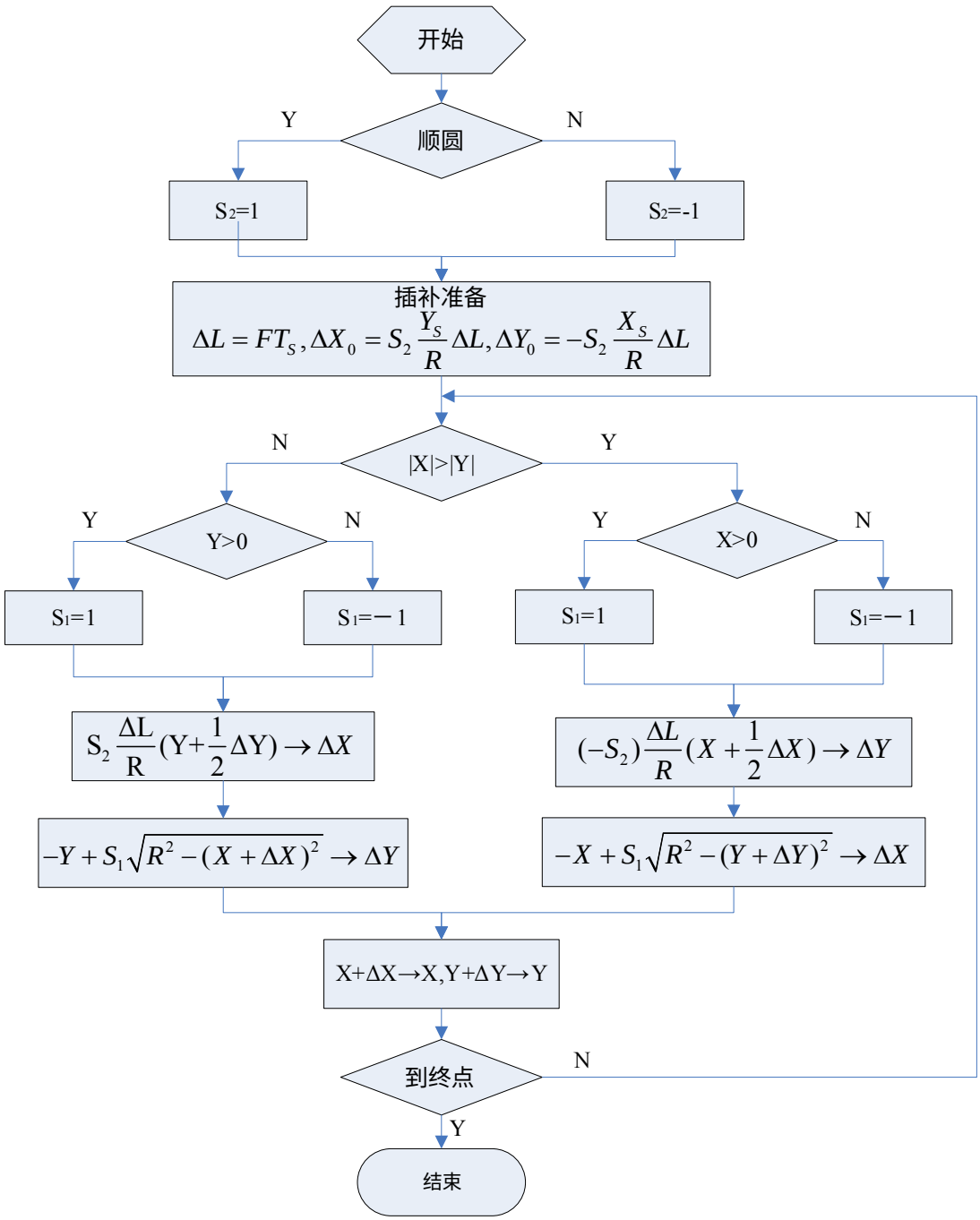


注意，数据采样法插补计算所使用的起始坐标，终点坐标及插补所得到的动点坐标均为带有符号的代数值。

数据采样法圆弧插补的基本思路是在满足加工精度的前提下，用弦线或割线来代替弧线实现进给，即用直线段逼近圆弧。

数据采样圆弧插补有直接函数法－内接弦线法，一阶近似 DDA 算法－切线法，二阶近似 DDA 算法－割线法。

如图所示为直接函数法圆弧插补的算法流程。



7.2.6 合成速度与加速度

合成速度：

合成速度V是坐标系上各轴分速度的矢量和（为正值），以X、Y、Z、A分表表示X轴、Y轴、Z轴及主轴A轴，则各轴的速度为V_X，V_Y，V_Z，V_A，则：

$$V = \sqrt{V_x^{\,2} + V_y^{\,2} + V_z^{\,2} + V_A^{\,2}}$$

注：合成速度的单位为**坐标系长度单位/控制周期**，即 mm/ST。

合成加速度：

合成加速度Acc是坐标系映射各轴分加速度的矢量和（为正值），以X、Y、Z、A分表表示X轴、Y轴、Z轴及主轴A轴，则各轴的速度为Acc_x，Acc_y，Acc_z，Acc_A，则：

$$Acc = \sqrt{Acc_x^{\ 2} + Acc_y^{\ 2} + Acc_z^{\ 2} + Acc_A^{\ 2}}$$

注：合成加速度的单位为mm/ST^2。

7.3 实验设备

- XY 平台设备一套
- GT-400-SV 卡一块
- PC 机一台
- 配套笔架
- 绘图纸张若干
- VC 软件开发平台

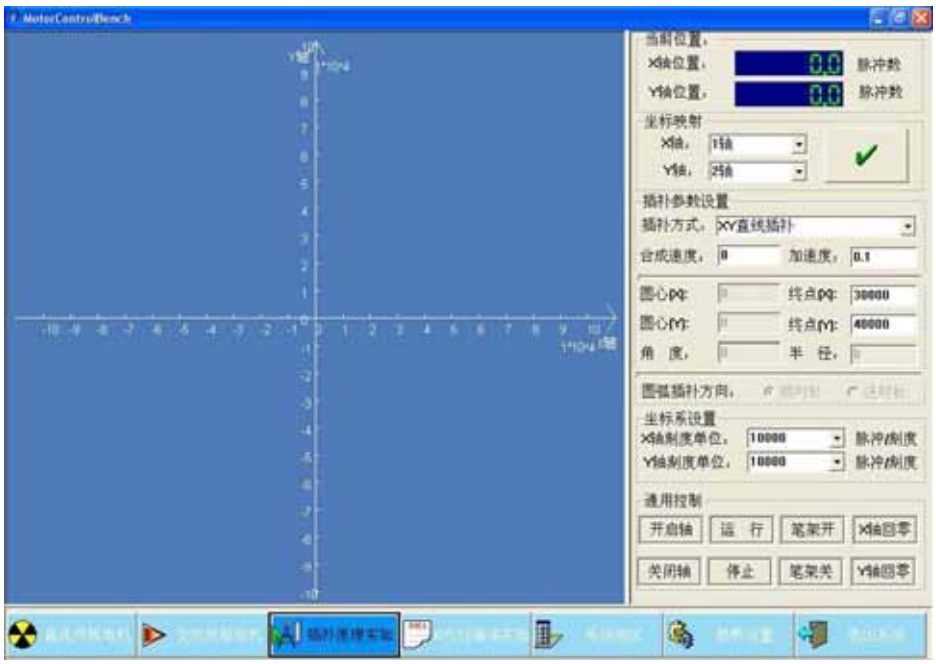
7.4 实验内容

重要	● 在进行以下实验时，应注意 XY 平台行程范围。实验前，先将 X 轴、Y 轴回零或手动调整至合适位置，以避免运动中触发限位信号。XY 平台 X 轴、Y 轴回零操作以及位置手动调整的具体方法请参阅运动控制平台软件使用说明书。 ● 当采用步进平台进行下列实验时，应注意合成加速度和速度值不宜设置过大，否则有可能由于步进电机启动频率过高，导致失步。

7.4.1 二维直线插补实验

1. 检查实验平台是否正常，打开电控箱面板上的电源开关，使系统上电；
2. 双击桌面“MotorControlBench.exe” 图标，打开运动控制平台实验软件，点击界面下方

按钮，进入如下图所示二维插补实验界面；



3. 输入合成速度和合成加速度；

参考示例如下图所示,设置合成速度＝8pulse/ST，合成加速度＝0.1pulse/ST^2。

4. 在“插补方式”的下拉列表中选择“XY 平面直线插补”，输入 X 终点和 Y 终点的值；参考示例如下图所示,设置终点（X）＝40000 pulse，终点(Y)＝60000 pulse；

5. 点击 开启轴 使伺服上电；

6. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；

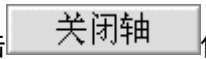
回零方法如下：点击“X 轴回零”按钮,X 轴将开始回零动作,待 X 轴回零完成,点击“Y 轴回零”按钮,使 Y 轴回零。

7. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“笔架落下”按钮，使笔架上的绘图笔尖下降至纸面；

8. 确认参数设置无误且 XY 平台各轴回零后，点击“运行”按钮 ；

9. 观察 XY 平台上对应电机的运动过程及界面中图形显示区域实时显示的插补运动轨迹。在“坐标系设置”中选择 X 轴和 Y 轴的坐标系刻度单位，以使图形显示处于合适大小；

注：坐标系刻度单位应与设置的 X、Y 终点值保持相同的数量级，以便观察。

10. 点击“ 笔架抬起 ”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,根据需要调整 XY 平台上的绘图纸位置或更换绘图纸；
11. 在教师指导下,改变运动参数(合成速度,加速度,终点坐标),重复执行 2~8 步,观察不同运动参数下 XY 平台的电机运动过程,笔架的绘图和界面中的显示图形及位置值,记录各实验数据和观察到的实验现象；
12. 在坐标映射栏中,改变坐标映射关系,将 X 轴映射为 2 轴,Y 轴映射为 1 轴,点击“ 坐标映射生效 ”按钮。重新执行 2~9 步,观察 XY 平台的运动情况；记录并比较不同设置时,笔架在绘图纸上绘制的图形,界面中的显示图形及位置值与映射关系改变前的异同；
13. 点击 

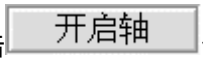
使伺服下电；
14. 实验结束。

7.4.2 圆弧插补（圆心/角度型）实验

1. 重复直线插补实验第 1 至 2 步；
2. 选择插补方式,设置圆弧插补参数；

在“ 插补方式 ”的下拉列表中选择“ XY 圆弧插补（圆心/角度）”，输入 X 圆心和 Y 圆心的值以及圆弧角度；**注意，软件默认圆弧起点为原点；圆弧角度为负表示顺时针方向，为正表示逆时针。**

参考设置如下图所示：

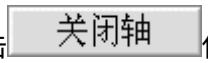
3. 点击 

使伺服上电；
4. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；
5. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“ 笔架落下 ”按钮,使笔架上的绘图笔尖下降至纸面；
6. 确认参数设置无误且 XY 平台各轴正确回零后，点击“ 运行 ” ；
7. 观察 XY 平台上对应电机的运动过程和界面中图形显示区域中实时显示的圆弧插补运动轨迹。

8. 点击“ 笔架抬起 ”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,根据需要调整 XY 平台上的绘图纸位置或更换绘图纸；

9. 在教师指导下,改变运动参数(合成速度,加速度,终点坐标),重复执行 2~9 步,观察不同运动参数下 XY 平台的电机运动过程,笔架的绘图和界面中的显示图形及位置值,记录各实验数据和观察到的实验现象；

10. 在坐标映射栏中,改变坐标映射关系,将 X 轴映射为 2 轴,Y 轴映射为 1 轴,点击“ 坐标映射生效 ”按钮。重新执行 2~9 步,观察 XY 平台的运动情况；记录并比较不同设置时，笔架在绘图纸上绘制的图形,界面中的显示图形及位置值与映射关系改变前的异同；

11. 点击 

使伺服下电；

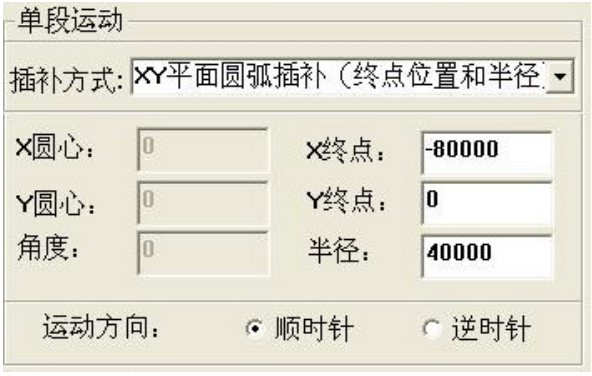
12. 实验结束。

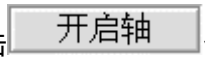
7.4.3 圆弧插补（终点/半径型）实验

	注意：实验中，默认圆弧起点为原点，设置的圆弧终点值，起点（绘图原点）及半径值应能正确构成圆弧（即半径值不能小于原点到终点之间距离的一半）。

1. 重复直线插补实验第 1 至 2 步；

2. 在“ 插补方式 ”的下拉列表中选择“ XY 圆弧插补（终点/半径）”，输入 X 终点和 Y 终点以及半径值，选择运动方向；**注意：**示例中设置 X 圆心＝-80000 pulse，Y 圆心＝0，半径＝40000 pulse，运动方向为顺时针；



3. 点击 

使伺服上电；

4. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；

5. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“ 笔架落下 ”按钮,使笔架上的绘图笔下降至纸面；

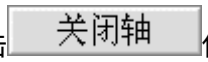
6. 确认参数设置无误且 XY 平台各轴正确回零后，点击“ 运行 ”；

7. 观察 XY 平台上对应电机的运动过程；此时软件界面左侧图形显示区域将实时显示圆弧插补运动轨迹。在“坐标系设置”中选择 X 轴和 Y 轴的坐标系刻度单位，以使图形显示处于合适大小。

8. 电机运动完成，点击“笔架抬起”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,根据需要调整 XY 平台上的绘图纸位置或更换绘图纸；

9. 在教师指导下,改变运动参数(合成速度,加速度,终点坐标),重复执行 2~9 步,观察不同运动参数下 XY 平台的电机运动过程,笔架的绘图和界面中的显示图形及位置值,记录各实验数据和观察到的实验现象；

10. 在坐标映射栏中,改变坐标映射关系,将 X 轴映射为 2 轴,Y 轴映射为 1 轴,点击“坐标映射生效”按钮，重新执行 2~9 步,观察 XY 平台的运动情况；记录并比较不同设置时，笔架在绘图纸上绘制的图形,界面中的显示图形及位置值与映射关系改变前的异同；

11. 点击 

使伺服下电；

12. 关闭 XY 平台电源，实验结束。

7.4.4 逐点比较法直线插补实验

1. 实验前准备：根据逐点比较法原理，绘制出以下情况的逐点比较法直线插补轨迹

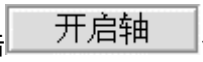
   a) 起点为（0，0），终点为（60000，80000），步长为 10000；

   b) 起点为（0，0），终点为（60000，80000），步长 5000；

2. 开始实验，重复执行 6.4.1 直线插补实验第 1 至 2 步；

3. 选择实验插补方式为“XY 直线插补（逐点比较法）；

4. 根据步骤 1-a)中的设置，输入逐点比较法直线插补参数；

5. 点击 

使伺服上电；

6. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；

7. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“笔架落下”按钮,使笔架上的绘图笔下降至纸面；

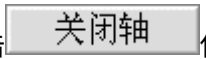
8. 确认参数设置无误且 XY 平台各轴正确回零后，点击“运行”；

9. 观察界面中绘制的实际插补轨迹（红色）和理想的直线（绿色）。根据实际插补轨迹检查步骤 1 中绘制的插补轨迹是否正确；

10. 点击“ 笔架抬起 ”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,更换绘图纸；

11. 将 X 轴和 Y 轴回零；

12. 依次修改步长为 5000，2000，1000。运行后，观察步长减少后对逐点比较法直线插补精度的影响；

13. 点击 

使伺服下电；

14. 关闭 XY 平台电源，实验结束。

7.4.5 逐点比较法圆弧插补实验

1. 实验前准备：根据逐点比较法原理，分别绘制出以下几种情况的圆弧插补轨迹：

   a) 步长为 10000，圆心为（0，0），起点为（50000，0），终点为（0，50000）逆时针插补；

   b) 步长为 5000，圆心为（0，0），起点为（50000，0），终点为（0，50000）逆时针插补；

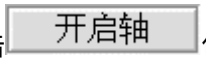
   c) 步长为 10000，圆心为（0，0），起点为（50000，0），终点为（-30000，-40000）顺时针插补；

   d) 步长为 5000，圆心为（0，0），起点为（50000，0），终点为（-30000，-40000）顺时针插补；

2. 开始实验，重复执行 7.4.1 直线插补实验第 1 至 2 步；

3. 选择实验插补方式为“ XY 圆弧插补（逐点比较法）；

4. 根据步骤 1 a)中的设置，输入逐点比较法圆弧插补的参数；

5. 点击 

使伺服上电；

6. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；

7. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“ 笔架落下 ”按钮,使笔架上的绘图笔下降至纸面；

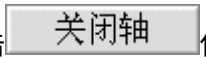
8. 确认参数设置无误且各轴正确回零后，点击“ 运行 ”；

9. 观察界面中绘制的实际插补轨迹（红色）和理想的直线（绿色)。根据实际插补轨迹检查步骤 1 中绘制的插补轨迹是否正确；

10. 点击“ 笔架抬起 ”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,更换绘图纸；

11. 按照步骤 1 中 b) 、c)、 d)的设置，重复执行 4-10 步；

12. 将步骤 1 中 a)和 c)中设置的步长减小到 1000，执行 4-10 步，观察步长减少后对逐点比较法圆弧插补精度的影响；

13. 点击 

使伺服下电；

14. 关闭 XY 平台电源，实验结束。

7.4.6 数字积分法直线插补实验

1. 实验前准备；

   1) 复习教材中关于数字积分法插补原理相关内容；

   2) 根据 DDA 直线插补原理和流程图，手工绘制出以下几种情况的 DDA 直线插补轨迹：

   a) 寄存器位长为 3，步长为 10000，起点为（0，0)，终点为（40000，30000)；

   b) 寄存器位长为 5，步长为 10000，起点为（0，0)，终点为（40000，30000)；

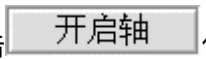
   c) 寄存器位长为 5，步长为 5000，起点为（0，0)，终点为（40000，30000)；

   d) 寄存器位长为 3，步长为 10000，起点为（0，0)，终点为（-40000，30000)；

2. 开始实验，重复执行 6.4.1 直线插补实验第 1 至 2 步，进入实验软件界面；

3. 选择实验插补方式为“ XY 直线插补（数字积分法)；

4. 根据步骤 1 -1）-a)中的设置，输入数字积分法圆弧插补参数；

5. 点击 

使伺服上电；

6. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；

7. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“笔架落下”按钮,使笔架上的绘图笔下降至纸面；

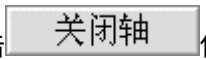
8. 确认参数设置无误且各轴正确回零后，点击“运行”；

9. 观察界面中绘制的实际插补轨迹（红色）和理想的直线（绿色)。根据实际插补轨迹检查步骤 1 中绘制的插补轨迹是否正确；

10. 点击“笔架抬起”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,更换绘图纸；

11. 按照步骤 1-1）中 b）、c)、 d)的设置，重复执行 4-10 步；

12. 将步骤 1-1)中 a)和 d)中设置的步长减小到 1000,寄存器位数设置为 6,执行 4-10 步，观察步长减少后对 DDA 法直线插补精度的影响；

13. 点击 

使伺服下电；

14. 退出实验软件，关闭 XY 平台电源，实验结束。

7.4.7 数字积分法圆弧插补实验

1. 实验前准备；

1) 复习教材中关于 DDA 圆弧插补原理相关内容；

2) 分别绘制出以下几种情况的圆弧插补轨迹：

   a) 累加寄存器位长为 3，插补步长为 10000，圆心为（0，0），起点为（50000，0），终点为（0，50000）顺时针插补；

   b) 累加寄存器位长为 5，插补步长为 10000，圆心为（0，0），起点为（50000，0），终点为（0，50000）顺时针插补；

   c) 累加寄存器位长为 3，插补步长为 5000，圆心为（0，0），起点为（50000，0），终点为（0，50000）顺时针插补；

   d) 累加寄存器位长为 3，插补步长为 10000，圆心为（0，0），起点为（50000，0），终点为（0，50000）逆时针插补；

2. 开始实验，重复执行 7.4.1 直线插补实验第 1 至 2 步；

3. 选择实验插补方式为“XY 圆弧插补（数字积分法）；

4. 根据步骤 1 a)中的设置，输入 DDA 圆弧插补的参数；

5. 点击 开启轴 使伺服上电；

6. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；

7. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“ 笔架落下 ”按钮,使笔架上的绘图笔下降至纸面；

8. 确认参数设置无误且各轴正确回零后，点击“ 运行 ”；

9. 观察界面中绘制的实际插补轨迹（红色）和理想的直线（绿色)。根据实际插补轨迹检查步骤 1 中绘制的插补轨迹是否正确；

10. 点击“ 笔架抬起 ”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,更换绘图纸；

11. 按照步骤 1-1）中 b) 、c)、 d)的设置，重复执行 4-10 步；

12. 将步骤 1-1)中 a)和 d)中设置的步长减小到 1000，寄存器位数设置为 6，执行 4-10 步，观察步长减少后对 DDA 法直线插补精度的影响；

13. 点击 关闭轴 使伺服下电；

14. 关闭 XY 平台电源，实验结束。

7.4.8 数据采样法直线插补实验

1. 开始实验，重复执行 7.4.1 直线插补实验第 1 至 2 步；

2. 选择实验插补方式为“ XY 直线插补（数据采样法）；

3. 设置插补参数；参考设置如图所示。

4. 点击 开启轴 使伺服上电；

5. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；

6. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“ 笔架落下 ”按钮,使笔架上的绘图笔下降至纸面；

7. 确认参数设置无误且各轴正确回零后，点击“ 运行 ”；

8. 观察界面中绘制的实际插补轨迹（红色）和理想的直线（绿色）。；

9. 点击“ 笔架抬起 ”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,更换绘图纸；

10. 分别改变插补参数中的插补周期和进给速度的设置，如将插补周期改为 1000，或将进给速度改为 500，重复执行 4-10 步，观察不同的参数设置对数据采样法直线插补的影响；

11. 点击 关闭轴 使伺服下电；

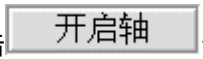
12. 关闭 XY 平台电源，实验结束。

7.4.9 数据采样法圆弧插补实验

1. 开始实验，重复执行 7.4.1 直线插补实验第 1 至 2 步；

2. 选择实验插补方式为“ XY 圆弧插补（数据采样法）；

3. 设置插补参数；参考设置如图所示。

4. 点击 

使伺服上电；

5. 将平台 X 轴和 Y 轴回零；

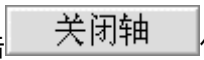
6. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张,点击“ 笔架落下 ”按钮,使笔架上的绘图笔下降至纸面；

7. 确认参数设置无误且各轴正确回零后，点击“ 运行 ”；

8. 观察界面中绘制的实际插补轨迹（红色）和理想的直线（绿色）。；

9. 点击“ 笔架抬起 ”按钮,将笔架上的绘图笔抬起,更换绘图纸；

10. 分别改变插补参数中的插补周期和进给速度的设置，如将插补周期改为 1000，或将进给速度改为 500，重复执行 4-10 步，观察不同的参数设置对数据采样法圆弧插补的影响；

11. 点击 

使伺服下电；

12. 关闭 XY 平台电源，实验结束。

7.4.10 插补算法的高级语言编程实验

学生可以利用 VC 开发环境进行直线插补和圆弧插补原理的软件实现实验。学生在软件实现中可以参考运动开发平台软件中插补算法的相关部分。

运动开发平台软件中实现插补算法的函数封装在 CInterpolation 类中，具体函数说明将程序中注释。

以最典型的 VC 为例，完成实验需要用到以下文件：

GT400.lib——运动控制器库文件

GT400.dll——运动控制器函数的动态链接库文件

GT400SV.h or GT400SG.h——运动控制器头文件

以上文件位于“ *\GT-400-SV-PCI\T4VP-CD-020626\Windows\DLL-1.5* ”中。

动态链接库函数调用方法请参考《GT 系列运动控制器编程手册》。

注：完成以上实验，主要需要参考以下说明书：《电机驱动器使用说明书》、《GT 运动控制器使用说明书》和《GT 运动控制器编程手册》等。

7.5 实验总结与思考

1、 根据实验结果，提交实验报告，实验报告中应包含以下内容：
各实验中 XY 平台绘制的插补轨迹图；
实验体会，包括实验中碰到的问题，解决办法和有关该实验的改进建议和收获。

2、 简述常见的插补算法，根据实验现象，分析逐点比较法和数字积分法的精度和局限性；

3、 根据实验结果说明寄存器位数对数字积分法插补精度和速度的影响并分析起原因；

4、 列出直线插补和圆弧插补运动所需参数，结合实验记录，分析不同映射设置对插补轨迹的影响，并理解其在实际应用中的意义；
5、 根据实验现象，分析数据采样法插补中插补周期对加工轮廓误差的影响；
6、 给出数据采样法中二阶近似 DDA 法－割线法的算法流程；
7、 指出圆心角度型和终点半径型圆弧插补的异同及各自应用场合。

第8章　丝杠反向间隙实验

8.1 实验目的

掌握几种位置检测装置（码盘、光栅尺）的使用方法及信号处理方法。理解半闭环控制系统误差的测量；理解丝杠反向间隙的概念及其测量和补偿的方法。

8.2 实验原理

8.2.1 光栅尺与旋转编码器

光栅尺测量系统由光源、透镜、标尺光栅、指示光栅、光敏元件和信号处理电路组成。通常情况下，除标尺光栅与工作台装在一起随工作台移动外，光源、透镜、标尺光栅、指示光栅、光敏元件和信号处理电路均装在一个壳体内，做成一个独立部件固定在机床上。这个部件称为光栅的读数头，其作用是将莫尔条纹的信号转换成所需的电脉冲信号。当标尺光栅随工作台一起移动时，光源通过聚光镜后，透过标尺光栅和指示光栅形成忽明忽暗的莫尔条纹；光敏元件把光信号转换成电信号，然后通过信号处理电路的放大、整形、鉴相、倍频后输出或显示。为了测量转向，至少要放置两个光敏元件，两者相距 1/4 莫尔条纹间距，这样当莫尔条纹移动时，会得到两路信号相位相差 $\pi/2$ 的波形；将输出信号送入鉴向电路，即可判断移动方向。

旋转编码器是一种角位移传感器，分为光电式、接触式和电磁式三种，光电式旋转编码器是闭环控制系统中最常用的位置传感器。旋转编码器可分为增量式编码器和绝对式编码器两种。光电式增量编码器测量系统原理如图所示 ，系统由光源、聚光镜、光电码盘、光电码盘狭缝、光栏板、光敏元件和信号处理电路组成。当光电码盘随工作轴一起转动时，光源通过聚光镜，透过光电码盘和光栏板形成忽明忽暗的光信号，光敏元件将光信号转换成电信号，然后通过信号处理电路的整形、放大、分频、计数、译码后输出或显示。为了测量旋转方向，光栏板的两个狭缝距离应为 $m + (1/4)\tau$（τ 为码盘两个狭缝之间的距离，即节距， m 为任意整数 ），这样，两个光敏元件的输出信号就相差了 $\pi/2$ 相位；将输出信号送入鉴相电路，即可判断码盘的旋转方向。

8.2.2 反向间隙测试原理

当丝杠向其相反方向运动时,由于丝杠反向间隙的存在会造成一段空运转,这时丝杠转动,但工作台不动,此种情况下产生的误差称为反向间隙误差。

测试丝杠 A,B 两点间的反向间隙一般方法如下。

测试记下光栅尺反馈的当前位置数据 A ，使轴移动给定的距离如 10mm 到 B 点 ，然

后使轴反向移动 10mm ，记录下光栅尺反馈的位置数据 B ，则反向间隙值=|A-B|，这个值也是用于反向间隙补偿的补偿量。

8.3 实验设备

- XY 平台设备一套
- GT-400-SV 卡一块
- PC 机一台

8.4 实验步骤

1. 按下电控箱上“ 系统上电 ”按钮，使实验平台上电；
2. 双击桌面“ MotorControlBench.exe ” 图标，打开运动控制平台实验软件，点击界面下方

按钮，进入反向间隙实验窗口；
3. 设置显示单位为“ 脉冲数 ”；
4. 根据需要选择测试方案，如选择“ 给定起点＋行程 ”；
5. 在测试参数栏中输入测试起点和测试行程等参数，比如：设置测试起点为 50000pusle，测试终点为 100000pulse；
6. 点击“ 开启伺服 ”按钮，使电机伺服上电；
7. 点击“ 回零点 ”按钮，使轴回零；
8. 点击“ 到测试起点 ”按钮，使轴运行到测试起点位置；
9. 点击“ 开始测试 ”按钮，进行给定测试区域内的丝杠反向间隙测试，轴将从测试起点自动运动到测试终点，再从测试终点返回测试起点。
10. 测试完成后，将出现信息框，给出测试的反向间隙值；记录测试的反向间隙值；

学生可以利用 VC 开发环境进行反向间隙补偿的软件实现实验。学生在软件实现中可以参考运动开发平台软件中反向间隙测试的相关部分。

以最典型的 VC 为例，完成实验需要用到以下文件：

GT400.lib——运动控制器库文件

GT400.dll——运动控制器函数的动态链接库文件

GT400SV.h or GT400SG.h——运动控制器头文件

以上文件位于“ *\GT-400-SV-PCI\T4VP-CD-020626\Windows\DLL-1.5* ”中。

动态链接库函数调用方法请参考《GT 系列运动控制器编程手册》。

注：完成以上实验，主要需要参考以下说明书：《电机驱动器使用说明书》、《GT 运动控制器使用说明书》和《GT 运动控制器编程手册》等。

8.5 实验总结

1. 根据实验现象，分析反向间隙的形成原因；
2. 简述数控系统位置测量装置的分类及应用。
3. 简述常用数控系统的位置测量装置。
4. 根据实验，指出半闭环控制系统和全闭环控制系统的 优缺点及应用场合
5. 简述数控机床位置精度的测试与补偿方法。

第9章　数控代码编程实验

9.1 实验目的

了解数控代码的基本指令和开放式运动控制器数控代码库的使用方法，理解基于 PC 的数控编程的实现过程，掌握简单数控程序的编制方法。

9.2 基础知识

数控编程的基本知识，利用运动控制器

数控编程的方法，基本数控指令的说明。专用数控系统的编程方法。

在数控系统上加工零件时，要把加工零件的全部工艺过程、工艺参数和位移数据，以信息的形式记录在控制介质上，用控制介质上的信息来控制机床，实现零件的全部加工过程。这就是数控编程。

为了简化编制程序的方法和保证程序的通用性，国际标准化组织在 ISO－841 中规定了数控机床坐标系的统一标准，即：以右手法则确定的笛卡尔直角坐标系（the Right-handed Rectangular Cartesian Coordinate System）作为编程的标准坐标系，规定直线进给运动的坐标轴用 X、Y、Z 表示，称为基本坐标轴，围绕 X、Y、Z 轴旋转运动的圆周进给坐标轴分别用 A、B、C 表示。坐标轴的正方向，是假定工件不动，刀具相对于工件作进给运动的方向。

编程坐标用来指定刀具的移动位置。运动轨迹的终点坐标是相对于起点计量的坐标，称为相对坐标（增量坐标）；所有坐标点的坐标值均从编程原点计量的坐标，称为绝对坐标。相对坐标和绝对坐标分别应用于数控编程的增量编程方式（G91）和绝对编程方式（G90）。

数控加工程序是由一个个程序段组成，而一个程序段则由若干个指令字组成。每个指令字是控制系统的一个具体指令，由指令字符（地址符）和数值组成。例如：

```
% 1000
N01 G91 G00 X50 Y60
N02 G01 X1000 Y5000 F150 S300 T12 M03
…
```

程序段中不同的指令字符及其后续数值确定了每个指令字的含义，以下对基本指令做一简要介绍。

准备功能 G 指令

准备功能用字母 G 后面跟两位数字来编程。以下是基本 G 功能表：

表 9-1 G 代码以及功能

G 代码	组别	功　　能
G00	01	定位(快速进给)
G01		直线插补(切削进给)
G02		圆弧插补 CW(顺时针)
G03		圆弧插补 CCW(逆时针)

G17*	02	X(U)Y(V)平面选择
G18		Z（W）X（U）平面选择
G19		Y（V）Z（W）平面选择
G28	00	返回参考点
G29		从参考点返回
G90*	03	绝对坐标编程
G91		增量坐标编程
G92	00	设定工件坐标系

注意：

● 除 00 组外的指令为模态指令，即当该 G 功能被编程后，就一直有效，直至被同一组其它不相容的 G 功能代替。

● 在 G 功能后面标有“ * ”号的指令，是指开机时，CNC 所具有的工作状态。

● 00 组的指令为一次性指令，它只在其指令的程序段中有效。

● 如果不相容的 G 功能被编在同一程序段中，则 CNC 认为后写入的那个 G 功能有效。

1）G00 快速定位

● 指令格式：G00 X(U)_ Y(V)_

G00 指令用于快速点定位，两个轴同时进给，合成速度为最大位移速度。指令中的 X（U）和 Y（V）值确定终点坐标，起点为当前点。

2）G01 直线插补

● 指令格式：G01 X(U)_ Y(V)_ F_

G01 为直线插补运动，即两个轴以当前点为起点，以 F 指令指定的速度同时进给，终点位置由 X（U）和 Y（V）确定。速度字 F 具有模态性，即由 F 指令的进给速度直到变为新的值之前均有效，因此不必每个程序段均指定一次。单位：mm/min。

3）G02/G03 圆弧插补

使两轴以当前点为起点，按照给定的参数走出一段圆弧。其指令格式可以有两种形式：

G02/G03 X(U)_ Y(V)_ I_ J_ F_

X（U)、Y（V)：确定终点坐标；

I，J：分别对应 X,Y 方向上圆弧起点到圆心的距离(有符号)

F：插补速度

G02/G03 X(U)_ Y(V)_ R_ F_

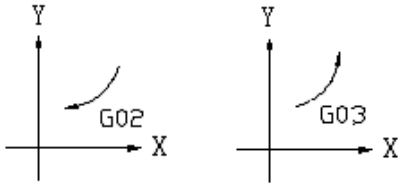
X（U)、Y（V)：确定终点坐标；

R：圆弧半径

F：插补速度

G02:顺时针圆弧 G03:逆时针圆弧

圆弧方向的规定如下所示。



9.3 实验设备

- XY 平台一套
- GT-400-SV 卡一块
- PC 机一台

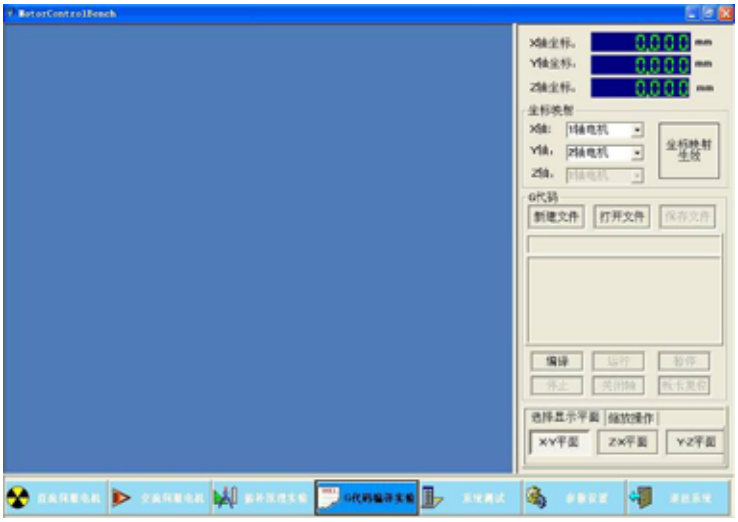
9.4 实验步骤

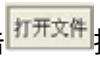
重要	● 在进行以下实验时，应注意 XY 平台行程范围。实验前，先进入二维插补实验界面将 X 轴、Y 轴回零或手动调整其位置，以避免运动中超出行程触发限位信号。回零及位置手动调整的具体方法请参阅运动控制平台软件说明书。 ● 本实验软件中，M03 指令对应笔架下落，M05 指令对应笔架抬起，可根据需要在 G 代码文件中加入相应的 M 指令。

利用运动控制平台软件，完成以下实验。

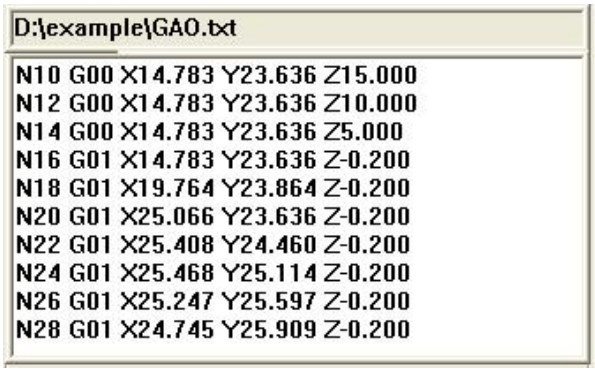
9.4.1 数控代码运行认识实验

1. 检查 XY 平台电气是否正常，打开电控箱面板上的电源开关，使系统上电；
2. 在 XY 平台的工作台面上,固定好实验用绘图纸张；
3. 双击桌面“MotorControlBench.exe” 图标，打开运动控制平台实验软件，点击界面下方 按钮，进入如下图所示界面；



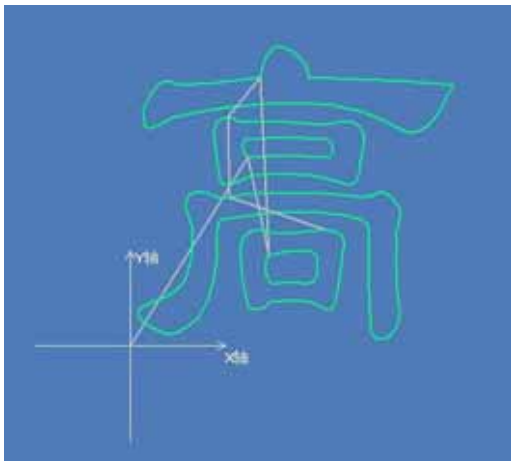
4. 点击 

按钮，在打开的对话框中选择 example 目录下的数控代码 GAO.txt 文件，点击对话框中“ 打开 ”按钮；
5. 观察出现在界面右侧 G 代码编辑区中的 G 代码文件，理解 G 代码程序段的组成；

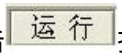


6. 点击

按钮，界面左侧将出现“ GAO.txt ”文件执行的模拟轨迹；



7. 点击

按钮，各轴伺服上电；
8. 在 XY 平台的工作台面上,固定实验用绘图纸张，调整好笔架位置；
9. 点击 

按钮，XY 平台电机开始运动，笔架上的画笔将在 XY 平台上的白纸上绘制“ 高 ”字，同时软件界面显示区内将实时绘制红色的 G 代码运行实际轨迹；
10. 观察实际运动轨迹与模拟轨迹是否一致，观察平台上电机的运动情况；

    在运动过程中，可根据观察需要对显示图形进行缩放或平移操作（具体操作见运动控制平台软件使用说明书）
11. 运动完成，点击“ 关闭轴 ”按钮；
12. 实验结束。

9.4.2 编写数控代码（G00/G01/G02/G03/G04 指令）实验

重要	本实验中编写的数控代码必须以 M30 或 M02 指令结束，否则，系统将不会运行程序并有可能导致异常错误。

1. 阅读以下 G 代码程序段，并在纸上绘制其各自的运行轨迹图；

数控代码文件 Test1.txt

N10 M03 G01 X10

N20 G01 Y10

N30 G01 X0 Y0

N40 M05 M30

数控代码文件 Test2.txt

N01 M03 G90 G01 X20

N02 G03 X-20 Y0 I-20 J0

N03 M05 M30

数控代码文件 Test3.txt

N10 G00 X10 Y10

N20 M03 G01 X20 Y20

N30 G02 X80 Y20 R30

N40 G03 X70 Y57.32 R20

N50 G01 X20 Y55

N60 G04 X10

N70 G00 X0 Y0

N80 M05 M30

数控代码文件 Test4.txt

N01 M03 G01 X10 Y10

N02 G01 X0

N03 G01 X30 F100

N04 G03 X40 Y20 I0 J0

N05 G02 X30 Y30 I0 J0

N06 G01 X10 Y20

N07 Y10

N08 M05 G00 X-10 Y-10

N09 M30

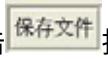
2. 执行数控代码认识实验步骤 1~2；
3. 在打开的 G 代码运行界面中，点击“ 新建文件 ”按钮，此时 G 代码编辑框中将清除原有代码；
4. 在 G 代码编辑区中键入数控代码文件 test1.txt 代码段：

   N10 M03 G01 X10

   N20 G01 Y10

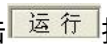
   N30 G01 X0 Y0

   N40 M05 M30

5. 检查确认代码输入无误后，点击 

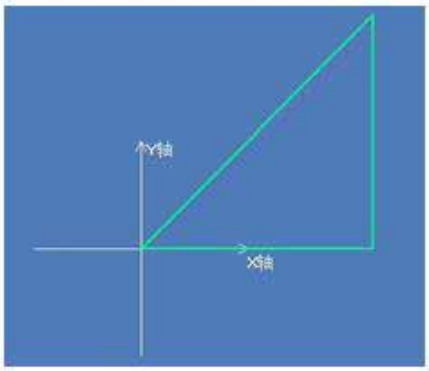
按钮；
6. 在打开的保存文件对话框中，将文件保存在 example 目录下，保存文件名为“ test1.txt ”，点击“ 保存 ”；
7. 点击

按钮，左侧显示区中将出现如图所示的“ test1.txt ”文件的 G 代码模拟运行轨迹；
8. 对应 G 代码文件，仔细观察显示区中的图形，找出各程序段所对应的直线段或圆弧段，理解基本数控指令的含义,并对照比较步骤 1 中绘制的图形是否正确；
9. 点击

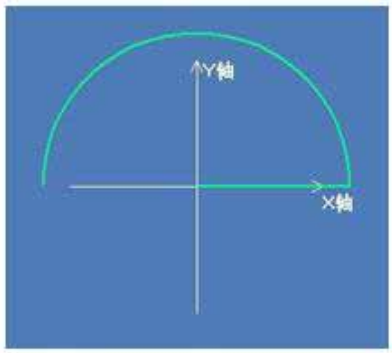
按钮，此时系统坐标映射设置生效，同时各轴伺服上电；
10. 更换实验用绘图纸张，调整好笔架位置；
11. 先后点击“ X 回零 ”和“ Y 回零 ”按钮，使各轴回到编程原点；
12. 点击 

按钮，运动控制平台上电机将开始运动，同时界面显示区内将实时绘制红色的 G 代码运行轨迹；
13. 运动完成，点击“ 关闭轴 ”按钮；
14. 重复执行 3~11 步， 依次编写并运行 test2.txt~test4.txtG 代码文件，观察实际运行情况，并检查步骤 1 中绘制的图形是否正确；
15. 点击 按钮，退出实验软件，关闭 XY 平台电源，实验结束。

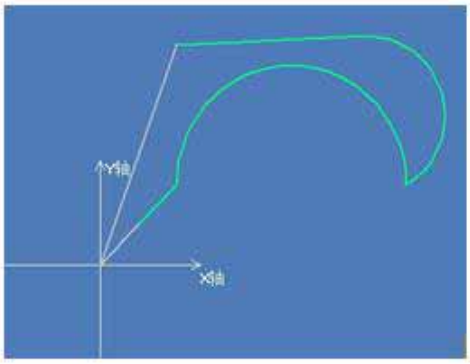
以下各图为各 G 代码文件执行时的运行轨迹：

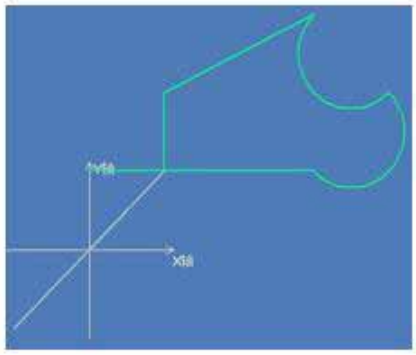


Test1.txt 文件 G 代码运行轨迹



Test2.txt 文件 G 代码运行轨迹





9.4.3 G17/G18/G19 指令编程实验

1. 实验前准备：分析比较以下代码的异同，参阅相关资料理解 G17/G18/G19 指令的含义及用途，绘制出三段数控代码在相应的工作平面上的运动轨迹；

数控代码文件 G17.txt：

N01 G90 G17 G00 X10 Y10
N02 G01 X30
N03 G03 X40 Y20 I0 J10
N04 G02 X30 Y30 I0 J10
N05 G01 X10 Y20
N06 Y10
N07 G00 X-10 Y-10
N08 M30

数控代码文件 G18.txt：

N01 G90 G18 G00 X10 Z10
N02 G01 Z30
N03 G03 X20 Z40 I10 K0
N04 G02 X30 Z30 I10 K0
N05 G01 X20 Z10
N06 X10
N07 G00 X-10 Z-10
N08 M30

数控代码文件 G19.txt:

N01 G90 G19 G00 Y10 Z10

N02 G01 Y30

N03 G03 Y40 Z20 J0 K10

N04 G02 Y30 Z30 J0 K10

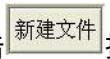
N05 G01 Y10 Z20

N06 Z10

N07 G00 Y-10 Z-10

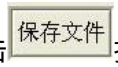
N08 M30

2. 执行数控代码认识实验步骤 1~3；

3. 在打开的 G 代码运行界面中，点击 

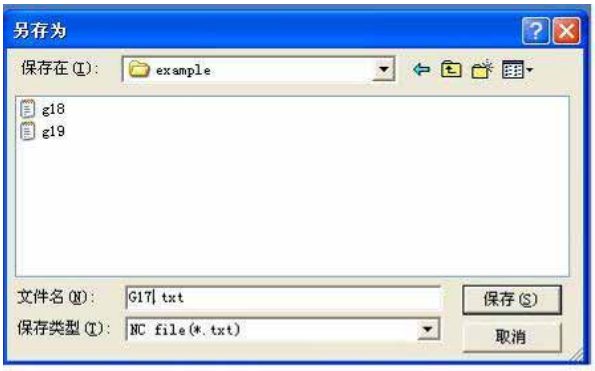
按钮；

4. 在 G 代码编辑区中键入步骤 1 中 G17.txt 文件中的数控代码；

5. 检查确认代码输入无误后，点击 

按钮；

6. 在打开的保存文件对话框中，将文件保存在 example 目录下，保存文件名为“ G17.txt ”，点击对话框中“ 保存 ”；



7. 在选择显示平面处点击

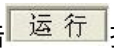
，将左侧显示区中的显示平面切换至 XY 平面；

8. 设置轴映射关系，将 X 轴映射为 1 轴，Y 轴映射为 2 轴，点击

按钮使映射关系生效，同时各轴伺服上电；

9. 更换实验用绘图纸张，调整好笔架位置；

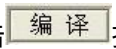
10. 点击

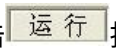
按钮，显示区中将出现 “ G17.txt ” 文件的 G 代码模拟运行轨迹，根据模拟轨迹，检查步骤 1 中绘制轨迹是否正确；
11. 先后点击 “ X 回零 ” 和 “ Y 回零 ”，将各轴回零；
12. 正确回零后，点击 

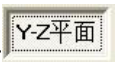
按钮，XY 平台上电机将开始运动，同时界面显示区内将出现红色的 G 代码实际运行轨迹，观察界面中实际运动轨迹是否与模拟轨迹一致；
13. 按照3~6步中的方法，将G18.txt的内容输入到G代码编辑区中，并将其保存为‘ G18.txt ”；
14. 在选择显示平面处点击

，将左侧显示区中的显示平面切换至 ZX 平面；
15. 设置轴映射关系，将 X 轴映射为 2 轴，Z 轴映射为 1 轴，点击

按钮使映射关系生效，同时各轴伺服上电；

16. 更换实验用绘图纸张，调整好笔架位置；
17. 点击 

按钮，显示区中将出现 “ G18.txt ” 文件的 G 代码模拟运行轨迹，观察图中的坐标轴定义，根据模拟轨迹，检查步骤 1 中绘制轨迹是否正确，分析其与 G17.txt 文件 G 代码运动轨迹的异同；
18. 点击回零按钮，将各轴回零；
19. 点击 

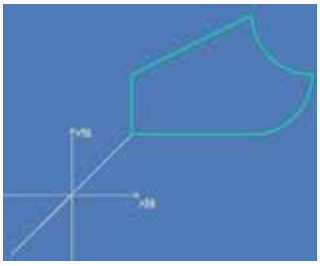
按钮，XY 平台上电机开始运动，界面显示区内实时绘制 G 代码运行轨迹，观察 XY 平台上笔架绘制的图形，观察界面中实际运动轨迹是否与模拟轨迹一致；
20. 按照 3~6 步中的方法，将 G19.txt 的内容输入到 G 代码编辑区中，将其保存为“ G19.txt ” 文件；
21. 在选择显示平面处点击 

，将左侧显示区中的显示平面切换至 YZ 平面；
22. 设置轴映射关系，将 Y 轴映射为 1 轴，Z 轴映射为 2 轴，点击

按钮使映射关系生效，同时各轴伺服上电；

23. 更换实验用绘图纸张，调整好笔架位置；
24. 点击 编 译 按钮，显示区中将出现 “ G19.txt ” 文件的 G 代码模拟运行轨迹，观察图中的坐标定义根据模拟轨迹，检查步骤 1 中绘制轨迹是否正确，分析其与 G17.txt，G18.txt 文件运动轨迹的异同；
25. 点击回零按钮，将各轴回零；
26. 点击 运 行 按钮，XY 平台上电机将开始运动，观察 XY 平台上笔架绘制的图形，观察界面中实际运动轨迹是否与模拟轨迹一致；
27. 实验完成，点击 “ 关闭轴 ”；
28. 总结分析 G17/G18/G19 指令的含义及其用途。

以下为三个 G 代码文件运行时的实际轨迹图：



9.4.4 G90/G91/G92 指令编程实验

1. 实验前准备：参阅相关资料理解 G92/G90/G91 指令的含义及用法，分析以下两段代码，绘制出数控代码的运动轨迹；

数控代码文件 G90_test.txt

N01 G92 X-30 Y-10

N02 G90 G17 G00 X10 Y10

N03 M03 G01 X30

N04 G03 X40 Y20 I0 J10

N05 G02 X30 Y30 I0 J10

N06 G01 X10 Y20

N07 Y10

N08 G00 X-10 Y-10

N09 M05 M30

数控代码文件 G91_test.txt

N01 G92 X-10 Y-10

N02 G91 G17 X20 Y20

N03 M03 G01 X20

N04 G03 X10 Y10 I0 J10

N05 G02 X-10 Y10 I0 J10

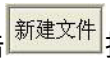
N06 G01 X-20 Y-10

N07 Y-10

N08 G00 X-20 Y-20

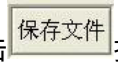
N09 M05 M30

2. 开始实验，执行数控代码认识实验步骤 1~3，进入实验软件界面中；

3. 在 G 代码运行界面中，点击 

按钮；

4. 在 G 代码编辑区中键入步骤 1 中 G90_test.txt 文件中的数控代码；

5. 检查确认代码输入无误后，点击 

按钮；

6. 在打开的保存文件对话框中，将文件保存在 example 目录下，保存文件名为“G90_test.txt”，点击对话框中“保存”；

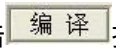
7. 在选择显示平面处点击

，将左侧显示区中的显示平面切换至 XY 平面；

8. 设置轴映射关系，将 X 轴映射为 1 轴，Y 轴映射为 2 轴，点击

按钮使映射关系生效，同时各轴伺服上电；

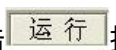
29. 更换实验用绘图纸张，调整好笔架位置；

9. 点击 

按钮，显示区中将出现“G90_test.txt”文件的 G 代码模拟运行轨迹，根据模拟轨迹，检查步骤 1 中绘制轨迹是否正确；

10. 对刀至 G92 指令设定的对刀位置 X=-10mm,Y=-10mm 处；

具体方法如下：在点动操作中先后点动 X-和 Y-，将当前刀具位置移动到(-10,-10)。

11. 点击 

按钮，XY 平台上电机将开始运动，观察 XY 平台上电机的运动, 观察界面中实际运动轨迹是否与模拟轨迹一致；

12. 改变 G92 指令中设定的对刀点位置；

具体方法如下：再次打开刚才保存的“G90_test.txt”文件，将 G92 指令行修改为：

N01 G92 X-30 Y-10；

其余指令不变，点击“ ”按钮，将编辑后的“ G90_test.txt ”文件存盘；

13. 点击 编 译 按钮，显示区中将出现修改后的“ G90_test.txt ”文件的 G 代码模拟运行轨迹，比较其与修改前轨迹的异同，理解 G92 指令在实际加工中的意义。
14. 点动各轴，对刀至新的对刀位置 X=-30mm,Y=-10mm 处；
15. 点击 运 行 按钮，XY 平台上电机将开始运动，观察 XY 平台上电机的运动, 观察界面中实际运动轨迹是否与模拟轨迹一致；
16. 开始 G91 指令实验，按照步骤 2~8 的方法，输入 G91_test.txt 数控文件并做好运行前准备；
17. 点击 编 译 按钮，显示区中将出现 “ G91_test.txt ”文件的 G 代码模拟运行轨迹，根据模拟轨迹，检查步骤 1 中绘制轨迹是否正确，并比较其与“ G90_test.txt ” 文件的 G 代码模拟运行轨迹的异同；
18. 对刀至 G92 指令设定的对刀位置 X=-10mm,Y=-10mm 处；
19. 点击 运 行 按钮，XY 平台上电机将开始运动，观察 XY 平台上电机的运动, 观察界面中实际运动轨迹是否与模拟轨迹一致；
20. 待各轴完成运动，实验完成，关闭实验平台电源，清理实验桌面。

9.5 实验报告及总结

1. 认真完成以上实验，记录实验步骤和结果。
2. 分析说明 G00、G01、G02、G03、G04、G17、G18、G19、G90、G91、G92 等基本 G 指令的功能和含义。
3. 分析比较基于 PC 的数控编程与专用数控系统的数控编程的优势和缺点。